

**“ESTUDIO DEL FENÓMENO DE
MAGNETOIMPEDANCIA GIGANTE MIG EN CINTAS
MAGNETICAMENTE BLANDAS DE ALEACIONES $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Cr}_x\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$
CON $0 \leq x \leq 10$ ”**

TESIS DE MAESTRÍA EN FÍSICA

VICTOR HUGO VALENCIA SERNA

**FACULTAD DE CIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN FÍSICA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES
DICIEMBRE 2004**

**“ESTUDIO DEL FENÓMENO DE
MAGNETOIMPEDANCIA GIGANTE MIG EN CINTAS
MAGNETICAMENTE BLANDAS DE ALEACIONES $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Cr}_x\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$
CON $0 \leq x \leq 10$ ”**

TESIS DE MAESTRÍA

Presentada como requisito parcial para optar al título de Magíster en Ciencias - Física

VICTOR HUGO VALENCIA SERNA

DIRECTOR DE TESIS

ANDRÉS ROSALES RIVERA, Ph. D.

FACULTAD DE CIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN FÍSICA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MANIZALES

DICIEMBRE 2004

A la memoria de mi padre.

AGRADECIMIENTOS

Con todo mi corazón quiero agradecer a mi adorada familia, donde sin su apoyo moral y económico, no hubiera podido llevar a cabo mis estudios de Maestría y el desarrollo de este trabajo, a ella toda mi devoción y eterna gratitud.

Quiero agradecer a COLCIENCIAS por haberme acogido en su programa de “*Jóvenes Investigadores*”, y a la Dirección de investigaciones de Manizales DIMA de la Universidad Nacional de Colombia, a quienes gracias a su apoyo pude costear parcialmente mi pasantía en el departamento de Propiedades Ópticas, Magnéticas y de Transporte, del Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid ICMM (España), y mis estudios de Maestría.

Al Doctor Manuel Vázquez director del departamento de Propiedades Ópticas, Magnéticas y de Transporte, del Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid ICMM (España), y a todos sus colaboradores, en especial al Doctor Y. Li, por su valiosa colaboración.

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto “*Estudio de las Propiedades Físicas de Nuevos Materiales Magnéticos*”, convenio de cooperación especial 069-2002 suscrito entre la Universidad Nacional de Colombia y COLCIENCIAS, programa “*Jóvenes Investigadores*”.

Finalmente quiero expresar mi gratitud al Grupo de Magnetismo y Materiales Avanzados de Manizales, y en especial su director, el Doctor Andrés Rosales Rivera, por su apoyo y colaboración; amigos y compañeros que estuvieron acompañándome durante todo este proceso, a todos ellos muchas gracias.

RESUMEN

En este trabajo se fabricaron cintas amorfas de composición $Fe_{73.5-x}Cr_xNb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$, con $0 \leq x \leq 10$ por medio del método de solidificación rápida de la rueda fría “*melt spinning*”, las cuales presentan el fenómeno de Magnetoimpedancia gigante (MIG); éste consiste en el cambio tanto de la componente real como imaginaria de la impedancia de un material magnético blando cuando a través de él se hace pasar una corriente eléctrica ac de magnitud I_{ac} y frecuencia f en presencia de un campo magnético dc, H_0 . Tal efecto se ha presentado en materiales magnéticamente blandos en forma de hilos, cintas, películas y multicapas, en el estado amorfo, nanocristalino y cristalino. Para estudiar el efecto de MIG en estas cintas, se desarrolló un sistema económico, versátil, confiable, y preciso, que permite realizar mediciones de impedancia hasta 20 MHz, desarrollando un método que consiste en un divisor de voltaje realizado sobre un circuito serie formado por una resistencia y la muestra a estudiar; este método tiene como ventaja en que sólo se realizan dos contactos eléctricos sobre la muestra. Se presentan y describen los resultados obtenidos experimentalmente del efecto de MIG de las cintas fabricadas. Por último se propone el prototipo de un sensor de posición basado en el efecto MIG, construido con base de los resultados obtenidos y utilizando como elemento de detección una de las cintas estudiadas en este trabajo. El sistema se puede modificar para realizar estudios de impedancia en sistemas biológicos; en este caso la técnica se denomina bioimpedancia.

ABSTRACT

Amorphous ribbons of composition $Fe_{73.5-x}Cr_xNb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ with $0 \leq x \leq 10$ were prepared in this work by the *melt spinning* method of fast solidification. These ribbons manifest the giant magnetoimpedance effect (GMI) which is the change in both the real and imaginary components of the impedance that results from applying an AC electrical current of magnitude I_{ac} and frequency f in presence of a DC magnetic field, H_0 . This effect has been observed in soft magnetic materials in the form of wires, ribbons, films and multilayers, in the amorphous, nanocrystal, and crystal states. In order to study the GMI effect present in these ribbons, it was developed a system that is economic, versatile, reliable and high precision, capable of measuring at frequencies up to 20 MHz. The measurement of impedance in the system is done through a method that consists of a voltage divisor over a serial circuit formed by a resistor and the sample. One of the advantages of this method is the use of only two electrical contacts over the sample. Experimental results showing the GMI effect in the prepared ribbons are illustrated and described. Finally, a position sensor prototype is proposed based on the GMI effect and the results obtained in this work. It uses as element of detection one of the ribbons that was studied in this work. The system can be modified to study impedance in biological systems; in this case the technique is call bioimpedance.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN	1
1. MAGNETOIMPEDANCIA GIGANTE MIG.....	4
1.1 DESCRIPCIÓN DEL EFECTO DE MIG	4
1.1.1 Impedancia y el efecto piel.....	6
1.2 MIG EN FRECUENCIA BAJA, MEDIA Y ALTA	9
1.2.1 Región de frecuencia muy baja	9
1.2.2 Región de frecuencia baja e intermedia.....	10
1.2.3 Región de frecuencia alta	11
1.3 TEORIA DE LA MIG	12
1.3.1 Ecuaciones de Maxwell.....	13
1.4 ALGUNAS APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE LA MIG	17
1.4.1 Sensores de campo magnético	17
1.4.2 Sensores de corriente y posición	19
2. TÉCNICA EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE LA MIG.....	21
2.1 SISTEMA PARA LA MEDICION DE LA MAGNETOIMPEDANCIA GIGANTE, SMIG	21
2.1.1 Método por divisor de voltaje.....	24
2.1.2 Porta-muestras	25
2.1.3 Software de control.....	28
2.1.3 Pruebas de calibración	30
2.1.4 Posibles mejoras y otras aplicaciones	38
3. SÍNTESIS DE LAS MUESTRAS.....	41
3.1 PREPARACIÓN DE ALEACIONES MAGNÉTICAS AMORFAS	41
3.1.1 Método de solidificación rápida (SR).....	42

3.1.2 Método de “melt spinning” ó de la rueda fría	44
3.2 FABRICACIÓN DE LAS CINTAS AMORFAS DE COMPOSICIÓN $Fe_{73.5-x}Cr_xNb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ CON $x = 0,2,4,5,6,7,8$ y10.	46
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1 MEDICIONES DE MAGNETOIMPEDANCIA REALIZADAS SOBRE UN MICROHILO DE COMPOSICIÓN $Co_{80}Fe_{4.5}Si_{10}B_{1.5}Nb_4$	51
4.2 MEDICIONES DE MAGNETOIMPEDANCIA EN CINTAS DE COMPOSICIÓN $Fe_{73.5-x}Cr_xNb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ CON $x = 0,2,4,5,6,7,8$ y10.	54
4.2.1 Histéresis y simetría en el comportamieto MIG de las cintas a 4 MHz	69
4.2.2 Dependencia de la MIG con el ancho y longitud de la cinta	71
4.2.3 Dependencia de la magnetoimpedancia con la frecuencia	75
5. APLICACIÓN TECNOLÓGICA DE LA MIG: SENSOR DE POSICIÓN	78
5.1 DETALLES EXPERIMENTALES	78
5.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN	80
6. CONCLUSIONES	86
7. PERSPECTIVAS	88
APENDICE A	90
APENDICE B	97

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Razones de cambio en las componentes real (R), imaginaria (X) e impedancia total (Z) en función de la frecuencia en un hilo electrodepositado en capas de $\text{Co}_{90}\text{P}_{10}$ sobre Cu	5
Figura 1.2 Esquema de la definición de impedancia.	7
Figura 1.3 Geometría para la MI en: (a) hilo y (b) cinta.	14
Figura 1.4 Magnetoimpedancia en una cinta $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ tratada térmicamente ..	15
Figura 1.5 Diagrama electrónico de un sensor lineal de campo con multivibrador	18
Figura 1.6: (a) Diagrama de un sensor de corriente DC basado en MIG; (b) Linealidad de la señal de respuesta del sensor.	19
Figura 2.1 Diagrama de bloques del sistema para medir la Magnetoimpedancia Gigante SMIG.	22
Figura 2.2 Circuito serie entre la muestra y la resistencia, utilizado para el cálculo de la impedancia en la muestra.	24
Figura 2.3 Porta-muestras.	26
Figura 2.4 Circuito acondicionador de impedancias y fase.	27
Figura 2.5 Esquema de los terminales DB9 hembra del PC y DB25 macho utilizados en la conexión para la comunicación serial en configuración simple.	28
Figura 2.6 Comportamiento de una Resistencia de $100\ \Omega$ para diversos valores de frecuencia variando campo magnético externo.	31
Figura 2.7 Comportamiento de una Resistencia de $100\ \Omega$ en función de la frecuencia en ausencia de campo magnético externo H_0	31
Figura 2.8 Comportamiento de un Capacitor de $50\ \text{nF}$ en función del campo magnético externo. (a) $f = 1\ \text{MHz}$, (b) $f = 10\ \text{MHz}$ y (c) $f = 20\ \text{MHz}$	32

Figura 2.9 Comportamiento de un Capacitor de 50nF vs. frecuencia, en ausencia de campo magnético externo H_0 : (a) frecuencia entre 0.1 MHz y 20 MHz, y (b) entre 0.1 MHz y 2.5 MHz.....	34
Figura 2.10 Comportamiento de una Inductancia de 9.38 μ H en función del campo magnético externo: (a) $f = 100$ kHz,(b) $f = 500$ kHz y (c) $f = 1$ MHz.....	35
Figura 2.11 Comportamiento de una Inductancia de 9.38 μ H respecto a la frecuencia, en campo magnético externo $H_0 = 40$ Oe: (a) frecuencia entre 0.1 MHz y 5 MHz, y (b) entre 0.1 MHz y 10 MHz.....	37
Figura 3.1 Esquema de un sistema de melt spinning.....	45
Figura 3.2 Imagen de un sistema de melt spinning.	45
Figura 3.3 Imagen del proceso de fabricación por melt spinning.	46
Figura 4.1 Configuración utilizada para la medición de la MIG en una muestra en forma de cinta.	50
Figura 4.2 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en un microhilo de $Co_{80}Fe_{4.5}Si_{10}B_{1.5}Nb_4$ a diferentes frecuencias.....	52
Figura 4.3 (a) espectro de la razón de cambio y (b) efecto de histéresis a $f = 10$ MHz en el comportamiento de MIG en un microhilo de composición $Co_{80}Fe_{4.5}Si_{10}B_{1.5}Nb_4$	53
Figura 4.4 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 1 ($Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$) para diferentes frecuencias.....	55
Figura 4.5 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a dos picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 1 . Recuadro, comportamiento de tres picos.....	56
Figura 4.6 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 2 ($Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$) para diferentes frecuencias.....	57

Figura 4.7 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a dos picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 2 . Recuadro, comportamiento de tres picos.....	58
Figura 4.8 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 3 ($Fe_{71.5}Cr_2Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$) para diferentes frecuencias.....	59
Figura 4.9 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a dos picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 3 . Recuadro, comportamiento de tres picos.....	60
Figura 4.10 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 4 ($Fe_{69.5}Cr_4Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$) para diferentes frecuencias.....	61
Figura 4.11 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a dos picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 4 . Recuadro, comportamiento de tres picos.....	62
Figura 4.12 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 5 ($Fe_{67.5}Cr_6Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$) para diferentes frecuencias.....	63
Figura 4.13 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a tres picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 5 . Recuadro, comportamiento de tres picos.....	64
Figura 4.14 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 6 ($Fe_{65.5}Cr_8Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$) para diferentes frecuencias.....	65
Figura 4.15 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a dos picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la cinta 6 . Recuadro, comportamiento de tres picos.....	66

Figura 4.16 Razón de cambio de la MIG respecto al H_0 para las diferentes cintas a $f = 7$ MHz.....	68
Figura 4.17 Razón de cambio de la MIG respecto a la frecuencia para las diferentes cintas.	69
Figura 4.18 Efecto de histéresis en el comportamiento de MIG en (a) cinta 1 , (b) cinta 2 , (c) cinta 3 , (d) cinta 4 , (e) cinta 5 , y (f) cinta 6 , a $f = 4$ MHz.	70
Figura 4.19 Razón de cambio de la MIG respecto al campo magnético para la cinta 1 a diferentes anchos: (a) ancho 0.3mm y (b) 0.8mm a diferentes frecuencias.	72
Figura 4.20 Espectro de la Razón de cambio de la MIG para la cinta 1 con diferente ancho.	72
Figura 4.21 Razón de cambio de la MIG respecto a campo magnético para diferentes valores de corriente AC para un hilo a base de Co [3].	73
Figura 4.22 Razón de cambio de la MIG respecto al campo magnético para la cinta 6 a diferentes longitudes: (a) $f = 4$ MHz y (b) 8 MHz	74
Figura 4.23 Razón de cambio de la MIG respecto a la frecuencia para la cinta 6 con diferentes longitudes.....	74
Figura 4.24 Gráfico en 3D que ilustra la dependencia de la impedancia Z con la frecuencia para la cinta 2	76
Figura 4.25 Curva que ilustra la dependencia de la impedancia Z con la frecuencia para la cinta 2	77
Figura 5.1 Diagrama del sistema de medida desarrollado para hacer las pruebas al sensor de posición.....	79
Figura 5.2 Diagrama electrónico del sensor de posición.....	80
Figura 5.3 Comportamiento MIG en una cinta amorfa de $Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ de 5 cm de longitud por 0.2 mm de ancho a diversas frecuencias.	81
Figura 5.4 Comportamiento MIG en una cinta amorfa de $Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ de 5 cm de longitud por 0.2 mm de ancho a 7 MHz. (a) cambio de la impedancia en ohmios y (b) razón de cambio en la impedancia.....	82

Figura 5.5 Comportamiento del voltaje en una cinta de $Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ de 5 cm de longitud por 0.2 mm en función del campo magnético externo a $f = 7$ MHz.....	83
Figura 5.6 Dependencia del voltaje con la distancia entre el sensor y un imán permanente de NdFeB. El campo magnético del imán fue orientado paralelamente al eje longitudinal de la cinta.	84
Figura 5.7 Esquema de una posible aplicación del sensor basado en MIG para la detección de un móvil.	85
Figura A1. Ventana principal del programa SMIG.	91
Figura A2. Ventana de Impedancia vs Campo del programa SMIG.....	92
Figura A3. Lista de frecuencias formada para realizar las respectivas mediciones.	93
Figura A4. Cuadro de diálogo de selección de tipo de medición.....	94
Figura A5. Ventana de Impedancia vs Frecuencia del programa SMIG.....	95
Figura A6. Lista de campo magnético formada para realizar las respectivas mediciones. ..	96

INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

En la última década los fenómenos de magnetotransporte se han tornado un tópico de alto interés científico y tecnológico. Este interés surgió debido al descubrimiento de los fenómenos de magnetorresistencia gigante (MRG) en multicapas, magnetorresistencia colosal (MRC) en manganitas y la magnetoimpedancia gigante (MIG) en aleaciones magnéticamente blandas en forma de hilos, cintas, películas y multicapas, en el estado amorfo, nanocristalino y cristalino.

Aplicaciones tecnológicas, principalmente en el área de la sensorica y de grabación magnética, basadas en los anteriores fenómenos tienen en la actualidad grandes repercusiones económicas y sociales. Esto explica el gran impacto ocurrido en 1988 y los años posteriores, entre la comunidad científica del área de magnetismo con el descubrimiento del efecto de magnetorresistencia gigante (MRG) y de magnetorresistencia colosal (CMR) en manganitas, los cuales abrieron nuevas perspectivas tecnológicas en el área de grabación magnética empleadas principalmente en los discos duros de computadoras. Actualmente, los materiales que presentan MRG están integrados en la tecnología de almacenamiento magnético. Por otra parte, el llamado efecto de magnetoimpedancia gigante (MIG) está corriendo de forma paralela en el nuevo campo de los fenómenos de magnetotransporte. Actualmente la MIG está abriendo una nueva rama de investigación, combinando micromagnetismo de materiales magnéticamente blandos con la electrodinámica clásica.

En la actualidad, en varios países alrededor del mundo el fenómeno de MIG ha venido siendo objeto de gran estudio, pero en Colombia la investigación acerca de este tema se

encuentra apenas en su etapa inicial. Motivados por este hecho, en el desarrollo de esta tesis se realizó un amplio estudio del efecto MIG, y de sus potenciales aplicaciones tecnológicas.

Esta tesis está organizada de la siguiente manera: en la primera parte, se hace un estudio de algunos modelos teóricos de la MIG, que conlleven a un mejor entendimiento de los resultados experimentales obtenidos; además se enumeran las aplicaciones tecnológicas basadas en este fenómeno desarrolladas hasta el momento. Para las mediciones experimentales de la MIG realizadas en este trabajo, se desarrolló un sistema confiable, versátil y preciso, el cual tiene como ventaja respecto a los contruidos por otros laboratorios, su mayor rango de frecuencias de trabajo (hasta 20 MHz), y su bajo costo comparado con los equipos encontrados en el mercado. En el segundo capítulo se presenta una descripción detallada del sistema de medición desarrollado, el cuál tiene como gran ventaja respecto a otros utilizados para medir la MIG, en que solo se conectan dos contactos sobre la muestra a estudiar, minimizando así los efectos de resistencia y capacitancia en los contactos eléctricos. En la tercera parte se describe el método utilizado para la fabricación de las muestras en forma de cintas amorfas magnéticamente blandas de composición $Fe_{73.5-x}Cr_xNb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ con $x = 0, 2, 4, 6, 8$ y 10 estudiadas en esta tesis; éstas fueron preparadas en el departamento de Propiedades Ópticas, Magnéticas y de Transporte, del *Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid ICMM* (España), en colaboración del Doctor Manuel Vázquez. En el cuarto capítulo se muestran los resultados obtenidos de la medición de la MIG en las diferentes cintas, y se hace una discusión de los mismos. Gracias al amplio estudio del efecto de MIG realizado en las cintas, se obtuvieron notorios e interesantes resultados, como lo es el comportamiento de tres picos en la respuesta de la MIG, el cuál hasta el momento ha sido difícil de observar hallar y aún no se tiene una teoría que explique su manifestación. En la quinta parte se presenta el prototipo de un sensor de posición, como posible aplicación tecnológica de la MIG, el cual utiliza como elemento de detección una de las cintas estudiadas en este trabajo. Por último se enumeran las

conclusiones obtenidas a partir de los resultados obtenidos y se presentan las perspectivas de investigación relacionadas con el estudio realizado en este trabajo.

1. MAGNETOIMPEDANCIA GIGANTE MIG

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión del efecto de Magnetoimpedancia Gigante MIG, así como algunos modelos propuestos con el fin de interpretar los resultados obtenidos experimentalmente. Por último se describen algunas aplicaciones tecnológicas importantes basadas en dicho fenómeno. En este trabajo para cantidades vectoriales se usa la notación, por ejemplo en el caso del campo magnético, $\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{h}$, con sus componentes DC (\vec{H}_0) y AC (\vec{h}).

1.1 DESCRIPCIÓN DEL EFECTO DE MIG

El fenómeno de magnetoimpedancia gigante, MIG, fue observado a inicios de la década de los noventa, donde debido a su mayor variación ($\sim 100\%$) que la del efecto de magnetorresistencia ($\sim 1\%$), desde entonces, se han realizado numerosos estudios teóricos y experimentales sobre distintos materiales magnéticamente blandos en forma de hilos, cintas, películas, y multicapas, en el estado amorfo, nanocristalino y cristalino [1].

Fenomenológicamente, el efecto de MIG consiste en el cambio de la impedancia AC en un material, $Z = R + iX$ (donde R es la parte real o resistiva, y X es la parte imaginaria o reactancia), cuando esté es sometido a un campo magnético estático H_0 . Se define usualmente la razón de cambio de MIG como:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{Z(H_0) - Z(H_{0Max})}{Z(H_{0Max})} \times 100\%, \quad (1.1)$$

donde Z es el modulo de la impedancia ($Z^2 = R^2 + X^2$) y H_{0Max} es el máximo campo magnético, donde la muestra se considera magnéticamente saturada. Por ejemplo, se han reportado razones de cambio de MIG hasta de 600% en microhilos amorfos, a frecuencias alrededor de 1 MHz para campos magnéticos aplicados H_{0Max} del orden de decenas de Oe (miles de Am^{-1}).

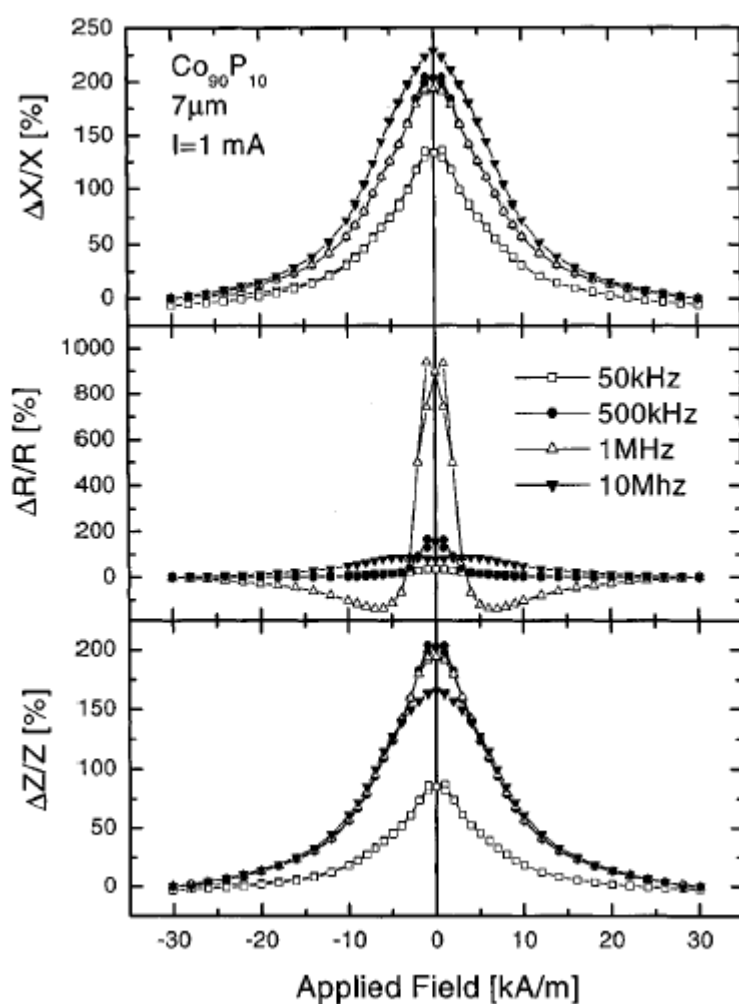


Figura 1.1 Razones de cambio en las componentes real (R), imaginaria (X) e impedancia total (Z) en función del campo magnético a diversas frecuencias en un hilo electrodepositado en capas de $\text{Co}_{90}\text{P}_{10}$ sobre Cu [2] .

Aparte del campo DC aplicado, el parámetro principal determinante en el efecto de MIG es la frecuencia de la corriente que genera el campo magnético circular AC. Dependiendo de la frecuencia, el efecto de MIG se puede separar en tres regiones: (i) Muy baja frecuencia de 1 – 10 kHz; (ii) Baja e intermedia frecuencias de 10kHz a 100MHz; y (iii) Alta frecuencia, alrededor de los GHz. En la sección 1.2, se describirá con mayor detalle cada una de estas tres regiones.

1.1.1 Impedancia y el efecto piel

El efecto piel, quien es el responsable del efecto MIG a medianas frecuencias, es un fenómeno bien descrito por la electrodinámica clásica [2] muchos años atrás. Como una consecuencia de las corrientes parásitas inducidas, las corrientes de alta frecuencia AC no están uniformemente distribuidas en el volumen del conductor, sino que están confinadas

en la superficie, con una profundidad $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$, donde ω es la frecuencia circular, ρ es la resistividad y μ la permeabilidad magnética. Asumamos un conductor recto e infinito (satisfaciendo la ley de Ohm $\vec{e} = \rho\vec{j}$, donde \vec{e} es el vector campo eléctrico AC, ρ la resistividad y \vec{j} el vector de densidad de corriente AC), con un área seccional q (ver figura 1.2). La impedancia Z medida entre dos puntos a una distancia L esta dada por:

$$Z = \frac{U_{ac}}{I_{ac}} = \frac{\int_L e_z(S) dz}{\iint_q j_z dq} = \rho \frac{\int_L j_z(S) dz}{\iint_q j_z dq}, \quad (1.2)$$

donde j_z y $e_z = \rho j_z$ son las amplitudes de las componentes longitudinales de la densidad de corriente y el campo eléctrico respectivamente a lo largo del eje z. El símbolo S se refiere a la superficie del conductor. Si la densidad de corriente j_z es independiente de la coordenada z entonces se tiene:

$$\frac{Z}{R_{dc}} = \frac{j_z(S)}{\langle j_z \rangle_q}, \quad (1.3)$$

donde $R_{dc} = \rho L/q$ es la resistencia DC y $\langle j_z \rangle_q$ denota el valor promedio de la densidad de corriente en la sección q .

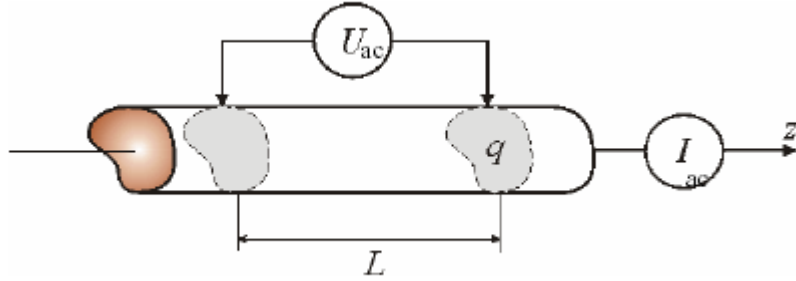


Figura 1.2 Esquema de la definición de impedancia.

Usando la ley de Ampere $I = \oint_C \vec{h} dl$, donde C es el contorno del área q , la corriente total esta dada por $I_{ac} = l h_\phi(S)$, donde $h_\phi(S)$ es la componente circular (tangencial a la superficie y perpendicular a z) del campo magnético AC en la superficie y l la longitud del contorno C . En metales la relación dada por la componente tangencial de \vec{e} y \vec{h} en la superficie puede ser descrito por el tensor de impedancia superficial $\hat{\zeta}$ de 2x2 [2].

$$\vec{e}_t(S) = \hat{\zeta} \vec{n} \times \vec{h}_t(S), \quad (1.4)$$

donde n es el vector normal de la superficie, con dirección hacia afuera del conductor. Usando las ecuaciones (1.2) y (1.4), se puede encontrar una relación entre Z y la impedancia superficial

$$Z = \frac{L}{l} \left(\zeta_{zz} - \zeta_{z\phi} \frac{h_z}{h_\phi} \right), \quad (1.5)$$

En el caso de que exista simetría especial (conductor cilíndrico, por ejemplo), cuando el tensor de impedancia superficial es diagonal o la componente axial de H es cero, el segundo término de la derecha desaparece y la impedancia es proporcional a la impedancia superficial ζ_{zz} . La componente fuera de la diagonal $\zeta_{z\phi}$, es la responsable de la MIG asimétrica, donde el comportamiento MIG no es igual en las regiones de campo magnético $H_0 < 0$ y $H_0 > 0$ [1], contrario a la MIG simétrica mostrada en la figura 1.1.

La impedancia calculada anteriormente se hizo asumiendo que el conductor es infinitamente largo. En un circuito real, constituido por el conductor al cual se le desea medir la impedancia y los conductores de los instrumentos de medida, existe una inductancia mutua L_e , la cual esta relacionada con la energía magnética almacenada en el circuito (fuera del volumen del conductor) [3], y puede ser añadida a la impedancia Z . Sin embargo, la inductancia mutua L_e , no es una propiedad intrínseca del conductor y depende de la geometría del circuito de medida. En una aproximación lineal, la impedancia de un conductor magnético puede ser calculada a partir de las ecuaciones (1.3) y (1.5). Ambas formulas son prácticamente equivalentes debido a que la densidad de corriente \vec{j} y el campo magnético \vec{h} están relacionadas por medio de la ecuación de Maxwell $\vec{j} = \text{rot } \vec{h}$.

La esencia de la MIG radica en el factor de que en materiales magnéticos extremadamente blandos el efecto piel aparece a frecuencias mucho más bajas que las esperadas para un conductor no magnético con igual conductividad. Además de eso, la GMI requiere de una gran eficiencia del campo magnético estático para modificar la permeabilidad magnética AC, la penetración de piel y por consecuencia la impedancia. Por otra parte, en metales ferromagnéticos la permeabilidad AC es anisotrópica, esta depende de la orientación tanto de los campos magnéticos DC y AC (anisotropía magnética) y de la forma de la muestra. Por lo tanto, la permeabilidad AC, que toma parte en la MIG, es la permeabilidad transversal efectiva μ_t . En resumen, para observar la MIG, la permeabilidad transversal $\mu_t(H, f)$ en el caso de una geometría rectangular ó permeabilidad circular μ_ϕ en el caso de una

geometría cilíndrica, debe ser lo bastante grande y significativamente sensible para ser modificada por el campo magnético estático externo H_0 .

1.2 MIG EN FRECUENCIA BAJA, MEDIA Y ALTA

Dependiendo de la frecuencia f y la corriente I_{ac} que fluye a través de la muestra, la magnetoimpedancia gigante puede ser separada en tres diferentes regiones [4]:

- (i) Frecuencia muy baja ($f < 10$ kHz).
- (ii) Frecuencia baja e intermedia ($f \sim$ MHz).
- (iii) Frecuencia alta ($f \sim$ GHz).

1.2.1 Región de frecuencia muy baja

En el rango de muy baja frecuencia, la corriente aplicada simplemente genera un campo magnético circular dependiente del tiempo. Tal campo causa un cambio en el flujo magnético circular y genera un campo eléctrico longitudinal que al girar, produce un voltaje inducido a través de la muestra. En otras palabras, el voltaje inducido es determinado por la inductancia interna L_i que al girar, depende de la distribución espacial de la permeabilidad al interior de la muestra. Por ejemplo, cuando una corriente variante en el tiempo fluye a través de un hilo ferromagnético, un voltaje AC, U_{ac} (voltaje total) aparece entre los terminales del hilo. Este voltaje total es la suma compleja entre el voltaje resistivo U_R y el voltaje inductivo U_L :

$$U_{ac} = U_R + iU_L = R_{dc}I_{ac} + i\omega L_i I_{ac}, \quad (1.6)$$

donde R_{dc} es la resistencia DC de la muestra y $\omega = 2\pi f$. Cuando un campo magnético DC externo H_0 es aplicado, tanto la componente de la magnetización circular y la

permeabilidad circular cambian, produciendo un gran cambio en el voltaje total. Si la impedancia compleja de la muestra esta definida como la relación entre el voltaje total U_{ac} en la muestra y la corriente aplicada AC, I_{ac} , entonces:

$$Z = \frac{U_{ac}}{I_{ac}} = R_{dc} + i\omega L_i, \quad (1.7)$$

Lo anterior permite concluir que a muy bajas frecuencias, la dependencia de la impedancia con el campo magnético esta dada en términos inductivos, donde la inductancia es proporcional a la permeabilidad circular $\mu_\phi(I, H_0, f)$. Por lo tanto, a bajas frecuencias el cambio de la impedancia en estos materiales es exclusivamente atribuido al efecto magnetoinductivo que aparece por el proceso de magnetización circular en el hilo [5].

1.2.2 Región de frecuencia baja e intermedia

El cambio de la impedancia compleja en frecuencia moderada (10 kHz hasta algunos cientos de MHz), producido por un campo magnético DC externo, se conoció con el nombre de efecto de MIG. El fenómeno fue explicado en términos del efecto piel clásico en conductores magnéticos con una gran permeabilidad efectiva y una fuerte dependencia con la magnitud del campo magnético externo [6].

Por lo tanto, la explicación del comportamiento de MIG en una muestra en particular es equivalente al entendimiento de la dependencia de su permeabilidad con el campo magnético externo y la frecuencia. En la descripción clásica del efecto piel, la permeabilidad es considerada como una cantidad escalar. Sin embargo, en materiales ferromagnéticos, la situación es mucho más complicada, porque la inducción magnética \vec{B} y el campo magnético \vec{H} , generalmente no son paralelos y la relación entre ellos es no lineal, la permeabilidad AC es generalmente un tensor complejo, el cual no solo depende de la frecuencia f y del campo externo aplicado H_0 , sino también de algunos otros parámetros,

como de la amplitud del campo magnético AC asociado a la corriente aplicada a la muestra, a la anisotropía, distribución del estrés y a la estructura de los dominios en la muestra.

Usualmente, tanto el movimiento de las paredes de dominios y la rotación de la magnetización contribuyen en la permeabilidad transversal efectiva [7]:

$$\mu_t = \mu_{rot} + \mu_{dw}, \quad (1.8)$$

donde μ_{rot} y μ_{dw} son las contribuciones correspondientes a la permeabilidad transversal efectiva. En frecuencias bajas (menos de 1 MHz), ambas contribuciones son efectivas en el proceso de magnetización transversal. A mayores frecuencias, los movimientos de las paredes de dominios son fuertemente disminuidos por las corrientes parásitas y la rotación de la magnetización domina el proceso. Además a frecuencias desde algunos MHz a algunos cientos de MHz, donde el efecto piel se hace muy fuerte, la permeabilidad transversal se debe principalmente a la rotación de la magnetización. En este rango de frecuencias, el máximo de la MIG no se mueve hacia valores de campo más altos, donde la muestra es saturada. Por lo tanto, la estructura de los dominios aun está presente, y juega un papel importante en el comportamiento de la MIG.

1.2.3 Región de frecuencia alta

Aunque la resonancia ferromagnética (FMR) es usualmente estudiada en muestras saturadas excitadas por microondas alrededor de los 9 GHz ó mayores, hoy en día es aceptado que el efecto de MIG esta relacionado con la FMR, pero en rangos de frecuencia más bajos. Así, la explicación de la magnetoimpedancia se considera un efecto dinámico en la magnetización, relacionado a la FMR. Las condiciones básicas para obtener la resonancia ferromagnética son: (a) la presencia de un campo estático efectivo \vec{H}_{eff0} que induzca la orientación de los espines y (b) la presencia de una componente de campo magnético AC, \vec{h} perpendicular al campo magnético estático, donde \vec{h} puede presentar

una simetría planar para conductores planos, ó simetría circular, para el caso de hilos. Cerca a la resonancia, \vec{h} suministra energía para compensar las pérdidas asociadas a la interacción de la rotación de los momentos magnéticos con el medio circundante, manteniendo así la magnetización. Las consecuencias de la FMR se reflejan en cambios drásticos de la permeabilidad magnética, y por consecuencia en la impedancia también. En resonancia, un pequeño cambio en el campo magnético estático, tiene como resultado un gran cambio en la impedancia.

1.3 TEORIA DE LA MIG

Para darle una explicación a los datos experimentales, muchos autores inicialmente presentaron modelos basados en la minimización de la energía libre para algunas estructuras de dominios. Aunque estos tipos de modelos no son considerados como efectos dinámicos relacionados con el rápido movimiento de la magnetización, ellos son útiles para explicar los resultados experimentales a bajas frecuencias y para obtener importantes parámetros magnéticos. *Panina y Mohri* [8], teóricamente investigaron la influencia de las microcorrientes parásitas en los movimientos de las paredes de los dominios en el efecto MIG. Este modelo es válido para la región de baja frecuencia, donde la magnetización circular por los movimientos de las paredes de los dominios todavía es significativa. A altas frecuencias, cuando la rotación de la magnetización domina completamente el proceso de magnetización, las características dinámicas juegan un importante papel, y un modelo aún más riguroso debe basarse en la solución simultánea de las ecuaciones de Maxwell y la ecuación de Landau-Lifshitz para el movimiento de la magnetización. Este proceso es bien conocido por las teorías de la resonancia ferromagnética. Para alcanzar esta tarea, la permeabilidad dinámica efectiva ó total μ_t debe ser derivada ya sea para un hilo con anisotropía circular ó helicoidal y para una cinta con anisotropía planar uniaxial [7]. *Yelon* [7] demostró que la teoría de la resonancia ferromagnética en metales, desarrollado hace

mas de cuarenta años, toma explícitamente en cuenta el efecto de intercambio, en concordancia con lo observado en el efecto de MIG a altas frecuencias.

1.3.1 Ecuaciones de Maxwell

Debido a que la profundidad de piel así como las características de la correlación de la longitud de la estructura magnética (por ejemplo, el ancho de los dominios) en materiales magnéticamente blandos son mucho mas grandes que las distancias interatómicas, la electrodinámica clásica del medio continuo puede ser usada para describir el efecto de MIG. En metales ferromagnéticos, donde las corrientes de desplazamiento pueden ser despreciadas ($\dot{\vec{D}} = 0$) y con las relaciones en materiales $\vec{E} = \rho \vec{J}$ y $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$, entonces las ecuaciones de Maxwell pueden ser escritas como:

$$\nabla \times \vec{J} = -\frac{\mu_0}{\rho}(\dot{\vec{H}} + \dot{\vec{M}}), \quad (1.9)$$

$$\nabla \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = 0, \quad (1.10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \quad (1.11)$$

Aplicando el operador rotacional a la ecuación (1.9) y sustituyendo por el rotacional de \vec{J} y la divergencia de \vec{H} desde las ecuaciones (1.10) y (1.11), se obtiene la primera ecuación básica del problema

$$\nabla^2 \vec{H} - \frac{\mu_0}{\rho} \dot{\vec{H}} = \frac{\mu_0}{\rho} \dot{\vec{M}} - \nabla(\nabla \cdot \vec{M}). \quad (1.12)$$

Para obtener la solución, la relación entre los vectores \vec{M} y \vec{H} debe ser conocida. Separando los vectores \vec{M} y \vec{H} en sus componentes DC y AC $\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{h}$, $\vec{M} = \vec{M}_0 + \vec{m}$ y

asumiendo \vec{h} , $\vec{m} \propto e^{i\omega t}$ (aproximación lineal) y remplazándolos en la ecuación (1.12) se tiene

$$\nabla^2 \vec{h} - \frac{2i}{\delta_0^2} \vec{h} = \frac{2i}{\delta_0^2} \vec{m} - \nabla(\nabla \cdot \vec{m}), \quad (1.13)$$

donde $\delta_0 = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}}$ es la profundidad piel no magnética.

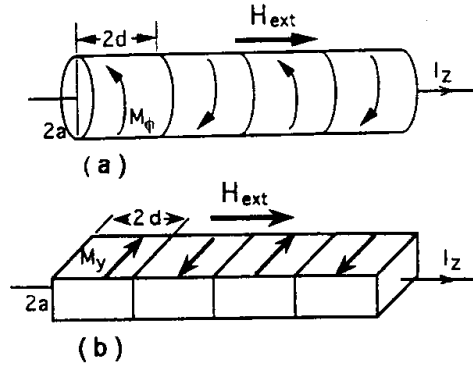


Figura 1.3 Geometría para la MI en: (a) hilo y (b) cinta.

De esta forma, se puede encontrar, por ejemplo para geometrías simples (figura 1.3), una aproximación lineal de la impedancia para cualquier frecuencia [10]. En un hilo, Z tiene la forma:

$$Z = R_{dc} ka \frac{J_0(ka)}{2J_1(ka)}, \quad k = (1+i)/\delta_m, \quad (1.14)$$

y en el caso de una cinta

$$Z = R_{dc} ika \coth(ika), \quad (1.15)$$

donde k es la constante de propagación, $\delta_m = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_t}}$ la profundidad de penetración magnética, R_{dc} la resistencia dc, J_0 y J_1 las funciones de Bessel de primer orden, a es el radio en caso del hilo y el ancho en el caso de la cinta. En el caso de un conductor magnético la permeabilidad total o efectiva μ_t deja de ser un escalar. Así para una dirección ϕ en el caso del hilo para el tensor $\hat{\mu}$, μ_t es definido desde $b_\phi = (\hat{\mu}h)_\phi = \mu_t h_\phi$, y el caso de la cinta para una dirección y ; si la corriente fluye en la dirección z , esta genera una inducción magnética $b_y = (\hat{\mu}h)_y = \mu_t h_y$. Las relaciones (1.14) y (1.15) muestran que la impedancia en un conductor magnético depende de la magnetización magnética y de la profundidad de penetración. En el caso de un fuerte efecto piel ($a/\delta_m \gg 1$), la impedancia $Z \propto (f\mu_t)^{1/2}$, como se ilustra en la figura 1.4.

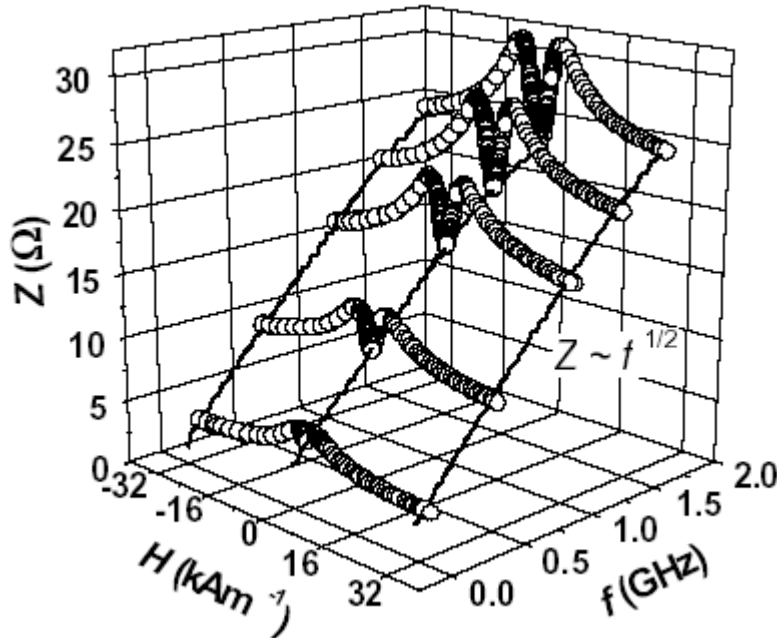


Figura 1.4 Magnetoimpedancia en una cinta $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ tratada térmicamente[4] .

Cuando un campo magnético DC H_0 es aplicado sobre la muestra la permeabilidad μ_t disminuye, incrementando la profundidad de penetración, cambiando la distribución de la corriente en la muestra y disminuyendo la impedancia.

El parámetro μ_t esta constituido por las contribuciones de los movimientos de las paredes de dominios μ_{dw} y el momento de rotación de la magnetización μ_{rot} : $\mu_t = \mu_{trot} + \mu_{tdw}$. Generalmente, μ_{dw} domina a frecuencias más bajas que la frecuencia de relajación ω_x de los movimientos de las paredes de dominios, mientras a altas frecuencias μ_{trot} es quien predomina, dado que la relajación es mucho más rápida en el caso del proceso de rotación. Algunos modelos teóricos intentan encontrar la dependencia de la permeabilidad total μ_t con la frecuencia, el campo aplicado DC H_0 y otros parámetros, los cuales describen el comportamiento de un material en especial a determinadas condiciones experimentales. Por ejemplo *Machado* propone para el caso de una cinta [1]:

$$\mu_t = \mu_0 \left(1 + \frac{4\pi\chi_t}{1 - i\omega\tau} - \frac{(\gamma\mu_0)^2 4\pi\bar{M}_s \left(H_0 + \bar{M}_s + i\frac{\Delta H_0}{2} \right)}{(\gamma\mu_0)^2 \left(H_0 + \bar{M}_s + i\frac{\Delta H_0}{2} \right) \left(H_0 + i\frac{\Delta H_0}{2} \right) - \omega^2} \right), \quad (1.16)$$

donde \bar{M}_s es la magnetización de saturación, γ es el factor giromagnético, y χ_t la susceptibilidad transversal. El primer término de la derecha resulta de la dinámica del movimiento de las paredes de dominios, mientras el segundo término resulta de la rotación de la magnetización, y es quien domina a frecuencias mayores a la frecuencia de relajación ω_x .

Es importante mencionar el hecho de que la magnitud de la MIG no solo depende de la frecuencia f y las propiedades del material (μ_t y ρ), sino que también de las dimensiones transversales de la muestra.

Otro fenómeno de alto interés que presentan algunos de los materiales que poseen el efecto de MIG, es el de *Estrés-Impedancia* [4], el cual consiste en el cambio de la impedancia eléctrica de un material cuando esté es sometido a cierta presión ó torsión mecánica, lo que lo hace ideal para el desarrollo de nuevos sensores magnetoelásticos (sensores de tensión y evaluación de la magnetostricción [11]).

1.4 ALGUNAS APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE LA MIG

El principal interés del efecto de magnetoimpedancia gigante se enfoca en el gran número de posibilidades que este fenómeno ofrece a la investigación tecnológica, principalmente en el desarrollo de nuevos sensores. A continuación se presentaran algunas aplicaciones basadas en estos tipos de sensores: sensores de campo magnético, corriente, posición y rotación.

1.4.1 Sensores de campo magnético

Sensores magnéticos con pequeñas dimensiones son los apropiados para un gran número de aplicaciones en sistemas de control y sistemas de medición inteligentes. Los microsensores más avanzados basados en MIG usan hilos con una longitud entre 1-2 mm. Alcanzan sensibilidades hasta de 100%/Oe ($1.25\%/Am^{-1}$) (razón de cambio de impedancia por Oe) a frecuencias de algunos MHz, con una resolución alrededor de 10^{-6} Oe (10 mAm^{-1}).

Sensores de microcampo magnético han sido desarrollados instalando cabezas MIG en circuitos oscilantes Colpits o en circuitos multivibradores (figura 1.5) seguidos por un demodulador detector, un amplificador diferencial y un circuito de retroalimentación negativa. Estos tienen sensibilidades del orden de 10^{-6} Oe a frecuencias cercanas a 1 MHz.

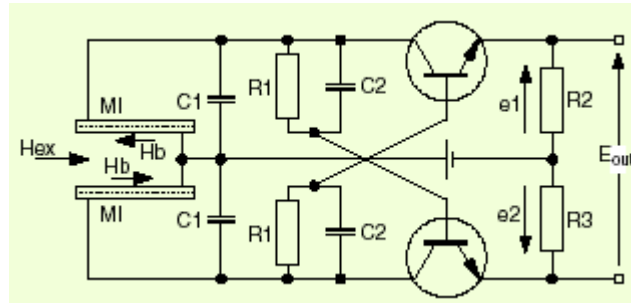


Figura 1.5 Diagrama electrónico de un sensor lineal de campo con multivibrador [12].

En la tabla 1.1, se ilustran algunas características importantes de sensores basados en diferentes principios. La ventaja de los sensores basados en MIG, se muestra cuando se compara la resolución. Se puede notar que la longitud de la cabeza de los sensores de MIG pueden ser hasta 20 veces más pequeñas que las de un sensor *fluxgate*, factor que incrementa fuertemente la resolución para la detección de polos magnéticos localizados. Comparando los sensores MR (magnetoresistivos) con los sensores MIG se puede notar que la razón de cambio relativa es solo del 2% para campos aproximadamente de 2400 Am^{-1} para los sensores MR, mientras para los MIG son mucho mayores.

TABLA 1.1 Comparación de algunos tipos de sensores magnéticos

Principio de funcionamiento del sensor	Longitud de la cabeza (m)	Resolución / escala completa (Am^{-1})	Velocidad de respuesta (Hz)	Consumo (W)
Hall	$10 \sim 100 \times 10^{-6}$	$40/\pm 80$	10^6	10^{-2}
Magnetorresistencia (MR)	$10 \sim 100 \times 10^{-6}$	$8/\pm 8 \times 10^3$	10^6	10^{-2}
Fluxgate	$10 \sim 20 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-5}/\pm 2.4 \times 10^2$	5×10^3	1
SQUID	$10 \sim 20 \times 10^{-3}$	$50 \times 10^{-12}/\pm 1 \times 10^{-6}$	5×10^3	-
Magnetoimpedancia	$1 \sim 2 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-5}/\pm 2.4 \times 10^2$	10^6	5×10^{-3}

1.4.2 Sensores de corriente y posición

Los sensores MIG de corriente están basados en la estimación del campo magnético generado por la corriente a medir. Un ejemplo de este tipo de sensor se ilustra en la figura 1.6, donde el campo magnético DC creado por una corriente que circula a lo largo de una placa de cobre es detectado a través del cambio de la impedancia en un hilo amorfo enrollado alrededor de la placa.

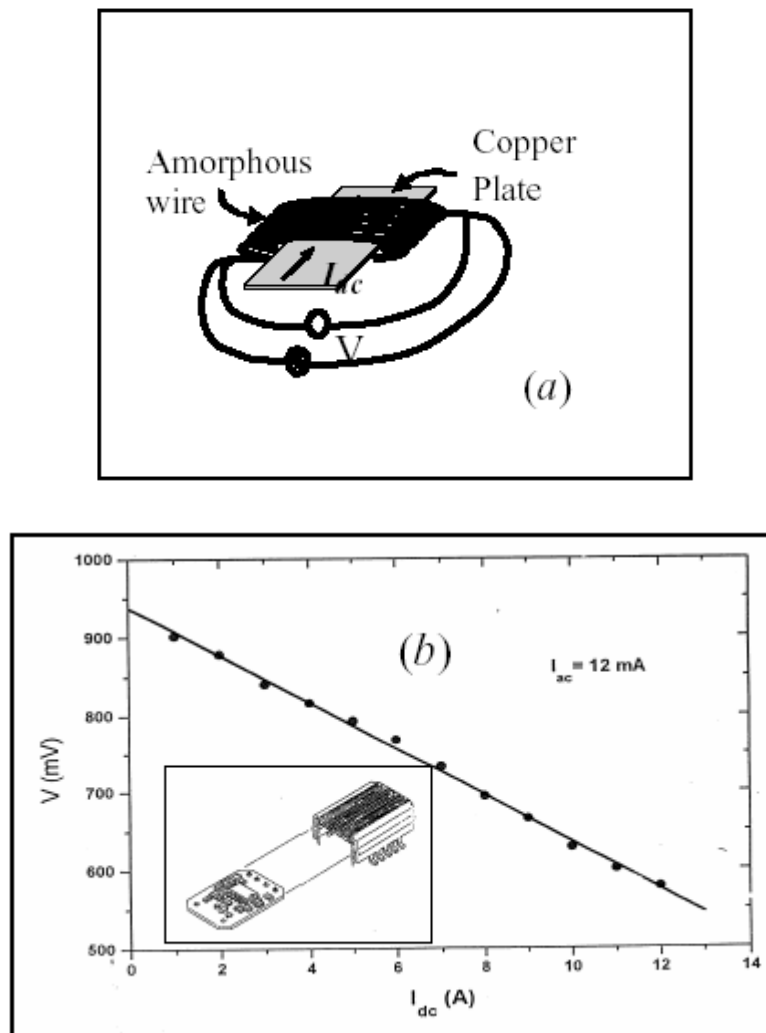


Figura 1.6: (a) Diagrama de un sensor de corriente DC basado en MIG.(b)Linealidad de la señal de respuesta del sensor.

Los sensores de posición basados en MIG, funcionan sensando el campo magnético generado por un imán permanente montado sobre el objeto al cual se le quiere conocer la posición. Este tipo de sensor se puede usar por ejemplo para el control de la posición de un pistón, para el control automático del registro los automóviles en un parqueadero, etc.

Referencias

- [1] F. L. Machado. *Magnetoimpedancia Gigante*. III Escola Brasileira de Magnetismo Jorge André Swieca, Porto Alegre (2001), p. 24-1.
- [2] J.P Sinnecker, M. Knobel, K. P. Pirota, J. M García, A. Asenjo and M. Vázquez. *J. Appl. Phys.*, vol. **87** / **9** (2000), p. 4825 - 4827.
- [3] Landau and Lifshitz. *Electrodynamics of Continuous Media Pergamon*. (1975).
- [4] M. Knobel, M. Vázquez and L. Kraus. *Giant Magnetoimpedance*. Versión 5 18th June 2002.
- [5] K. Mohri, K. Kawashima, T. Kohzawa and H. Yoshida., *IEEE Trans. Magn.*, vol. **29** (1993), p. 1245.
- [6] R. S. Beach and A. Berkowitz, *J. Appl. Phys.*, vol. **76** (1994), p. 6209.
- [7] L. V. Panina, K. Mohri, T. Ushiyama, M. Noda and K. Buchida. *IEEE Trans. Magn.*, vol. **31** (1995), p. 1249.
- [8] L. V. Panina and K. Mohri. *Appl. Phys. Lett.*, vol. **65** (1994), p. 1189.
- [9] A. Yelon, D. Menard, M. Britel and P. Ciureanu. *Appl. Phys. Lett.*, vol. **69** (1996), p. 3084.
- [10] L. V. Panina and K. Mohri. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. vol. **157** / **158** (1996), p. 137 - 140.
- [11] M. L. Sánchez, V. M. Prida, B. Hernando, M. Tejedor and M. Vázquez. *Recent Res. Devl. Non-Crystalline Solids*, vol **1** (2001), p. 191 - 201.
- [12] H. Hauser, L. Graus and P. Ripka. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*. June 2001, p. 28 - 32.

2. TÉCNICA EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE LA MIG

En este capítulo se describe el método desarrollado en este trabajo para medir el efecto de Magnetoimpedancia Gigante MIG en hilos y cintas en un rango de frecuencias que van desde los 10 kHz hasta 20 MHz. Se hace una descripción detallada de la construcción y automatización del sistema para la medición de la MIG, diseño del software de control, adquisición y procesamiento de datos. Por último se presentan los resultados de las pruebas iniciales realizadas con el fin de verificar el desempeño del sistema.

2.1 SISTEMA PARA LA MEDICIÓN DE LA MAGNETOIMPEDANCIA GIGANTE, SMIG

En el mercado existen diversos equipos especializados en la medición de impedancias a frecuencias bajas y altas (\sim GHz) como los analizadores de impedancias y redes por ejemplo, los cuales con unas pequeñas modificaciones se prestarían para la medición de la magnetoimpedancia, pero estos poseen una gran desventaja, su alto costo comercial. Por este motivo se optó por desarrollar un sistema económico, versátil, confiable, y de alta precisión, que permite trabajar a frecuencias hasta de 20 MHz, detalle a resaltar ya que según la bibliografía revisada solo se conocen sistemas contruidos para la medición de este fenómeno capaces de trabajar a frecuencias máximas de 10 MHz.

El sistema desarrollado para la medición de la magnetoimpedancia en muestras en forma de hilos y cintas que presenten dicho fenómeno, es totalmente automatizado, y se basa principalmente en el uso del Lock-In Stanford Research SR844 debido a su gran versatilidad y a que permite trabajar con señales de hasta 200 MHz. El diagrama de bloques del sistema para la medición de la MIG, se ilustra en la figura 2.1, el cual consiste de un Lock-In encargado de la medición de las señales, un generador de señales para suministrar la corriente AC a la muestra a estudiar, una fuente DC para alimentar las bobinas, unas bobinas de Helmholtz encargadas de generar el campo DC, H_0 , suministrado a la muestra, un gaussímetro para medir el campo, un porta muestras, y un PC encargado de gobernar todos los dispositivos que conforman el sistema y procesar los datos.

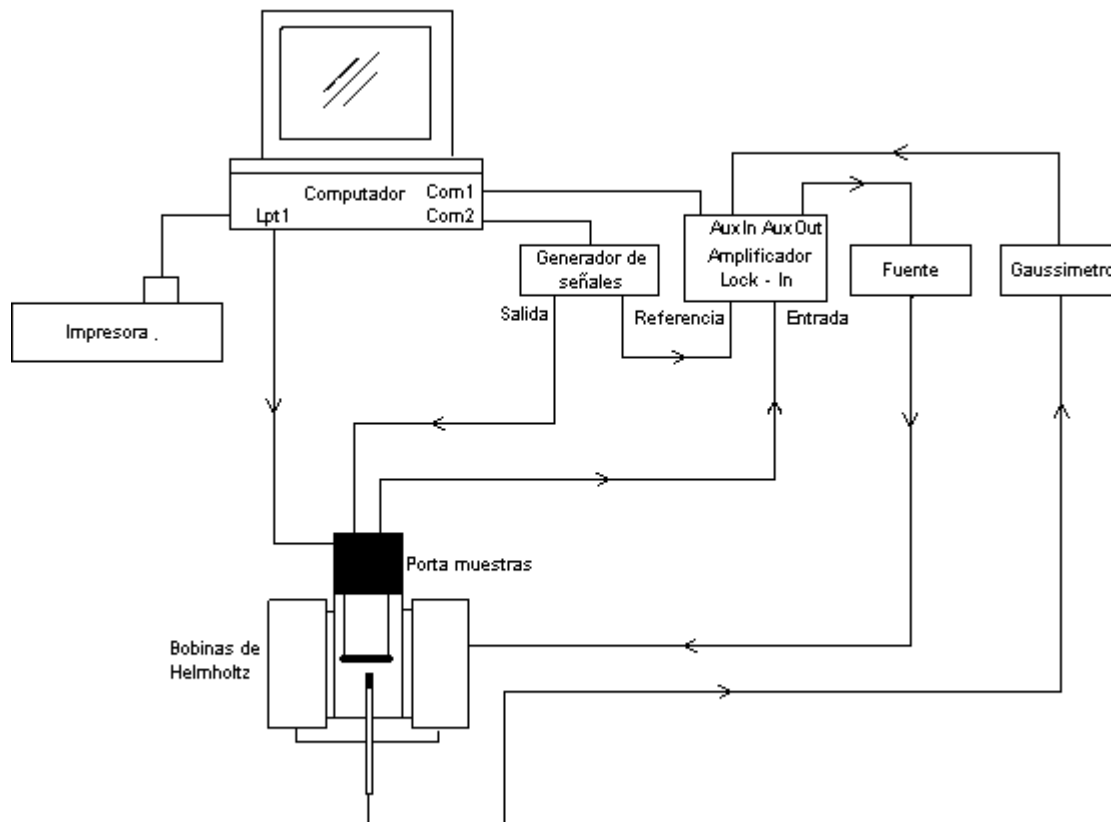


Figura 2.1 Diagrama de bloques del sistema para medir la Magnetoimpedancia Gigante SMIG.

El campo magnético H_0 DC es generado por medio de unas bobinas de Helmholtz alimentadas por una fuente de corriente bipolar Kepko BOP 20-5D controlada externamente por computador mediante una salida auxiliar del amplificador Lock-In. Dicho campo H_0 es altamente homogéneo, se aplica en la dirección paralela de la corriente en la muestra [1], y en los estudios presentes fue medido por un gaussímetro Lake Shore 450, el cuál se conecta por medio de su salida análoga a la entrada auxiliar del Lock-In para adquirir el valor de campo en el computador. El campo magnético máximo generado por el sistema es de ± 80 Oe, campo que es suficiente para saturar las muestras que presentan este fenómeno [2].

El generador de señales Stanford Research DS360 se controla vía RS-232 por PC de tal manera que suministre una onda senoidal de amplitud, frecuencia y fase constante. Dicha señal se lleva a la entrada del porta-muestras, donde ésta será acondicionada antes de ser suministrada al circuito serie formado por la resistencia y la muestra a estudiar. En el porta muestras también será acondicionada la señal de voltaje generada en la muestra.

El voltaje y el ángulo de desfase de la señal en la muestra a estudiar es medido por el amplificador Lock-In, el cual es un instrumento usado para aislar pequeñas señales AC en presencia de niveles potencialmente altos de ruido (miles de veces más grandes que la señal), esto lo hace tomando además de la señal a medir, una frecuencia de referencia o enganche ω_r , para luego detectar y amplificar la señal que se desea medir. El Lock-In se comunica con el computador vía RS-232, donde una vez adquiridas y procesadas las diferentes variables necesarias para calcular la impedancia en la muestra (ver sección 2.1.1), ésta es calculada y visualizada por medio del software de control. Para llevar las señales de frecuencia alta a los diferentes dispositivos, se utilizan cables blindados y de igual longitud especiales para trabajar con este tipo de señales, debido a que es primordial para la confiabilidad de las mediciones, que existan las menores alteraciones posibles producidas por las frecuencias altas.

El sistema se diseñó de tal forma que permita realizar mediciones variando el campo magnético dejando la frecuencia de la señal aplicada a la muestra fija o variando la frecuencia y dejando el campo magnético constante. Además el sistema permite variar el campo DC H_0 aplicado en la muestra en diversos modos ó ciclos de medida (ver apéndice A).

2.1.1 Método por divisor de voltaje

La medición de la impedancia en la muestra se realiza por medio de un divisor de voltaje formado por la muestra y una resistencia en serie (figura 2.2), método que tiene como principal ventaja con respecto a otros [3], en que sólo se realizan dos contactos eléctricos sobre la muestra a estudiar, minimizando así los efectos de resistencia y capacitancia ocasionadas en los contactos a frecuencia alta.

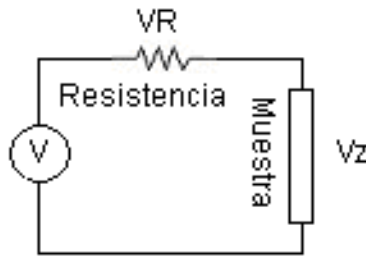


Figura 2.2 Circuito serie entre la muestra y la resistencia, utilizado para el cálculo de la impedancia en la muestra.

De acuerdo con la figura 2.2, si tomamos la impedancia en la muestra como $Z\angle\alpha$, entonces el voltaje en la resistencia fasorialmente viene dado por,

$$V_R\angle\beta = \frac{R}{R + Z\angle\alpha} V\angle 0^\circ \quad (2.1)$$

donde β es el ángulo de desfase entre el voltaje de la fuente $V\angle 0^\circ$ y el de la resistencia, y θ el desfase entre el voltaje de la fuente y el de la muestra.

El voltaje en la fuente,

$$V\angle 0^\circ = V_R\angle \beta + V_Z\angle \theta \quad (2.2)$$

Despejando de la Ecuación (2.2) el voltaje en la resistencia tenemos,

$$V_R\angle \beta = V\angle 0^\circ - V_Z\angle \theta \quad (2.3)$$

Reemplazando la Ecuación (2.3) en la Ecuación (2.1),

$$V\angle 0^\circ - V_Z\angle \theta = \frac{R}{R + Z\angle \alpha} V\angle 0^\circ \quad (2.4)$$

entonces,

$$Z\angle \alpha = \frac{R}{V\angle 0^\circ - V_Z\angle \theta} V_Z\angle \theta \quad (2.5)$$

Si $Z\angle \alpha = R_Z + jX_Z$, entonces,

$$R_Z = Z\cos \alpha \quad (2.6)$$

$$X_Z = Z\sin \alpha \quad (2.7)$$

donde R_Z y X_Z son la parte resistiva y reactiva respectivamente de la impedancia en la muestra.

2.1.2 Porta-muestras

El porta-muestras, ilustrado en la figura 2.3, consta principalmente de un circuito electrónico de acondicionamiento donde se conectan los cables coaxiales provenientes de la salida del generador de señales y la entrada del Lock-In respectivamente, y de una placa de

circuito impreso donde se ubica la muestra, la cual se une eléctricamente por medio de tinta de plata.

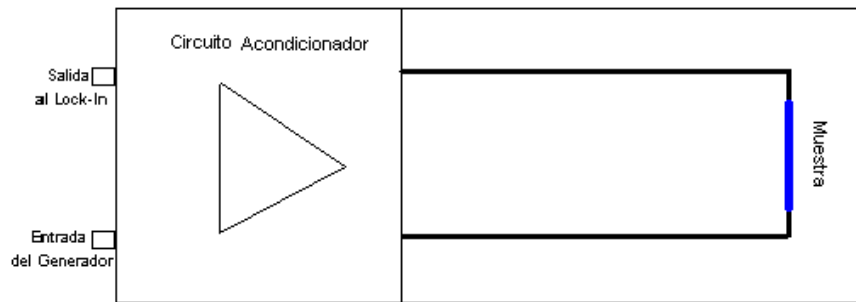


Figura 2.3 Porta-muestras.

El circuito de acondicionamiento se encarga de realizar varias funciones básicas para el correcto proceso de medición de la impedancia en la muestra. En primer lugar, acoplar eléctricamente las impedancias entre el generador de señales y el circuito serie formado por la resistencia y la muestra a $50\ \Omega$, y el acople de impedancia entre la muestra y la entrada del Lock-In a $50\ \Omega$; en segundo lugar, conocer el voltaje que esta entregando realmente el generador de señales al circuito y poner el ángulo de desfase de la señal del generador con la referencia en cero al inicio de cada medición; y, por último, albergar la resistencia que se coloca en serie con la muestra y a su vez tener ésta fuera de las bobinas de Helmholtz. En la figura 2.4 se muestra el esquema electrónico de dicho circuito. Cabe notar que la construcción de este circuito se realizó con las normas adecuadas y con componentes electrónicos diseñados especialmente para trabajar con señales pequeñas y de alta frecuencia, para evitar así interferencias y atenuación en las señales presentes en el circuito.

La alimentación de la tarjeta de acondicionamiento se realizó por medio de la fuente de Protek DF1731SB3A, y se utiliza el pin 2 (D0) del puerto paralelo del computador para accionar el relé que conmuta la entrada del Lock-In entre el voltaje suministrado al circuito serie resistor-muestra y el voltaje en la muestra.

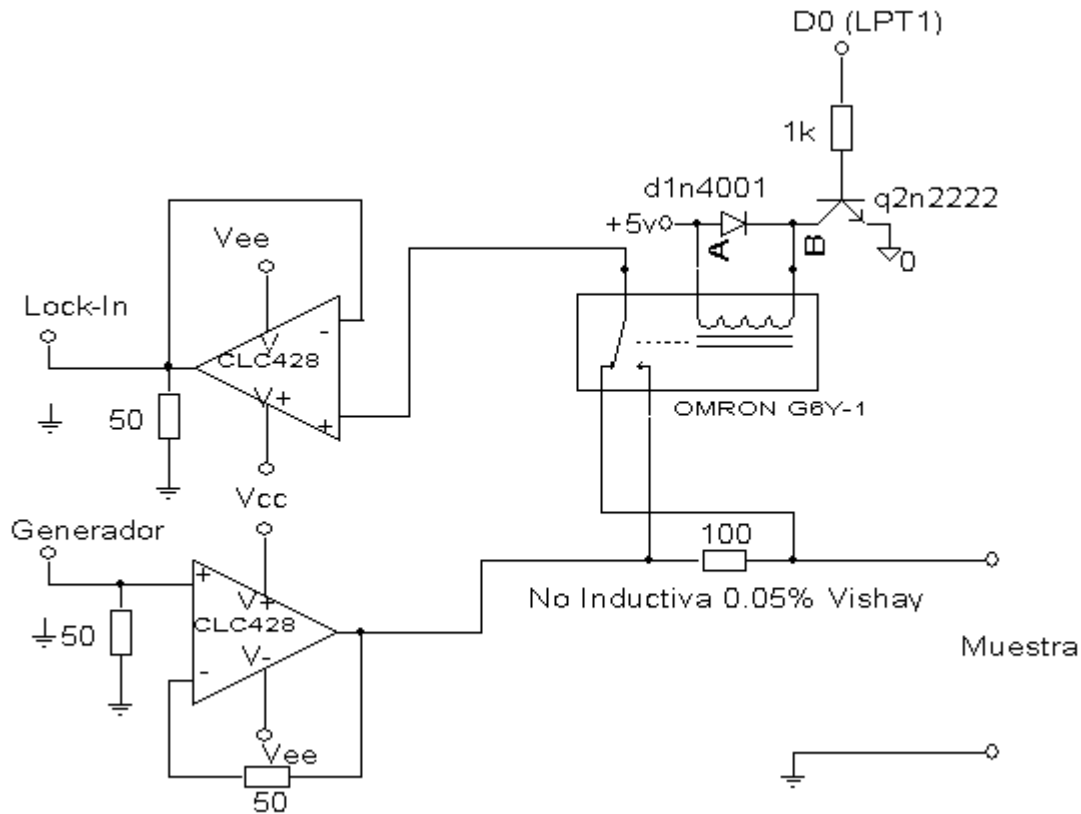


Figura 2.4 Circuito acondicionador de impedancias y fase.

El circuito acondicionador de impedancia y fase, consta de dos amplificadores operacionales National Instruments CLC428 [4] con retroalimentación no inversora de voltaje y un factor de amplificación de 1. El CLC428 es un amplificador operacional de alta velocidad y ultra bajo ruido, y tiene un ancho de banda de 160 MHz. El relé OMRON G6Y-1 [5], ideal para trabajar con pequeñas señales y de alta frecuencia, es utilizado para leer la señal de voltaje entregado al circuito serie y poner el desfase de ésta en cero con la señal de referencia, al inicio de una medida.

La resistencia utilizada en serie con la muestra es la Vishay/Dale PTF56 [6] de $100\ \Omega$ a $1/8$ W, no inductiva y con una tolerancia de precisión del 0.05 %. Con el empleo de esta resistencia de alta calidad y precisión, se garantiza una mayor confiabilidad en las medidas

realizadas en este sistema. Por otra parte, el uso de esta resistencia en serie es importante, debido a que limita la corriente aplicada a la muestra para evitar los efectos producidos por el calentamiento Joule [7].

2.1.3 Software de control

El manejo del sistema para la medición de la magnetoimpedancia gigante *SMIG*, involucra tres elementos básicos: el conjunto de equipos interconectados, un computador personal y un usuario.

Dado el grado de automatización conseguido en el sistema, el usuario solo es indispensable para comenzar una medición, monitorearla y suspenderla si fuera necesario. El usuario se vale de un software especial diseñado y desarrollado en Borland Builder C++ que establece la comunicación entre el PC y los diferentes equipos involucrados, que ofrece un conjunto de menús para configurar los diferentes parámetros, condiciones y modos para realizar una medida.

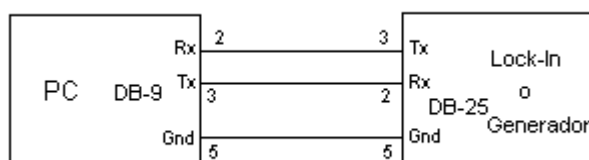


Figura 2.5 Esquema de los terminales DB9 hembra del PC y DB25 macho utilizados en la conexión para la comunicación serial en configuración simple.

La comunicación entre el *SMIG* y el PC se realiza a través del puerto serial, bajo el protocolo de comunicación RS-232, a una velocidad de 9600 baudios y utilizando dos cables para la conexión en configuración simple como se ilustra en la figura 2.5. En la tabla 2.1 se listan los diferentes parámetros de configuración utilizados para la comunicación serial en el sistema. Es importante que tanto el Lock-In como el generador de señales sigan estrictamente esta configuración para que haya un óptimo desempeño del sistema.

TABLA 2.1 Configuración Serial RS-232 del SMIG

Parámetro	Lock-In	Generador
Puerto	COM1	COM2
Bits de Datos	8 Bits	8 Bits
Paridad	No paridad	No paridad
Velocidad	9600 Baudios	9600 Baudios
Bits de Parada	1 Bit	2 Bits

Al inicializar el software, éste primero verifica que todos los equipos se encuentren correctamente conectados y configurados, abriendo los puertos seriales COM1 y COM2. De presentarse algún problema el programa reportará al usuario que existe algún error en la comunicación con el sistema.

El sistema permite realizar medidas ya sea variando el campo magnético y dejando la frecuencia de la señal aplicada sobre la muestra fija, o hacer un barrido en frecuencia con el campo aplicado fijo. En ambos casos, el algoritmo desarrollado en el software para determinar la impedancia de la muestra es el siguiente:

- Colocar el nivel de voltaje y la frecuencia de la señal sobre el circuito serie formado por la resistencia y la muestra.
- Conmutar el relé para leer el voltaje real aplicado sobre el circuito serie, y hacer cero el desfase entre la señal del generador y la señal de referencia.
- Medir el valor de campo magnético, el nivel de voltaje y el ángulo de desfase en la muestra.
- Usando las ecuaciones (2.5), (2.6) y (2.7) calcular los valores de impedancia en la muestra y sus componentes.
- Construir los gráficos de Z vs. H_0 , R_z vs. H_0 y X_z vs. H_0 , ó Z vs. F , R_z vs. F , X_z vs. F y X_z vs. R_z (*diagrama de Cole*), según el tipo de medición seleccionado.

Durante el proceso de medición, el software ilustra detalladamente el estado de la medida, permitiendo al usuario tener una buena supervisión de todas las variables presentes durante el proceso.

En el apéndice A se describe con mayor detalle el manejo del software escrito en Borland Builder C++ versión 5.0 diseñado para el control del *SMIG*, en el cual se pueden seleccionar los diferentes tipos de medición, como lo son variando campo H_0 o frecuencia f . En el modo de variación de la frecuencia se puede obtener la presentación en el diagrama de *Cole-Cole*, útil para realizar diversos estudios de impedancia.

2.1.3 Pruebas de calibración

En las pruebas y observaciones iniciales se utilizó el osciloscopio Agilent 54610B de dos canales, de amplio ancho de banda (500 MHz) y un multímetro digital Fluke 192, con el fin de monitorear las diferentes señales y comprobar el buen funcionamiento de los circuitos. Para verificar la confiabilidad y el buen desempeño del sistema, se realizaron como primeras pruebas mediciones en resistencias, capacitores e inductancias, cuyos valores de impedancia fueran conocidos. Todas las medidas fueron realizadas a temperatura ambiente.

Prueba 1: Se realizó empleando como muestra una resistencia de precisión de $100\ \Omega$ y una tolerancia del 0.5 %. En las figuras 2.6 y 2.7 se ilustra el valor medido y el dado por el fabricante (valor teórico) variando el campo magnético para diversos valores de frecuencia y variando frecuencia a campo magnético fijo de $H_0 = 0$ Oe respectivamente. En ambos casos, el comportamiento obtenido muestra que el valor de la resistencia esta en torno de los $100.2\ \Omega$, el cual se encuentra en el rango de tolerancia dado por el fabricante, y donde se ve que la influencia del campo magnético externo aplicado y de la frecuencia de la señal aplicada no alteran el valor de la resistencia medida.

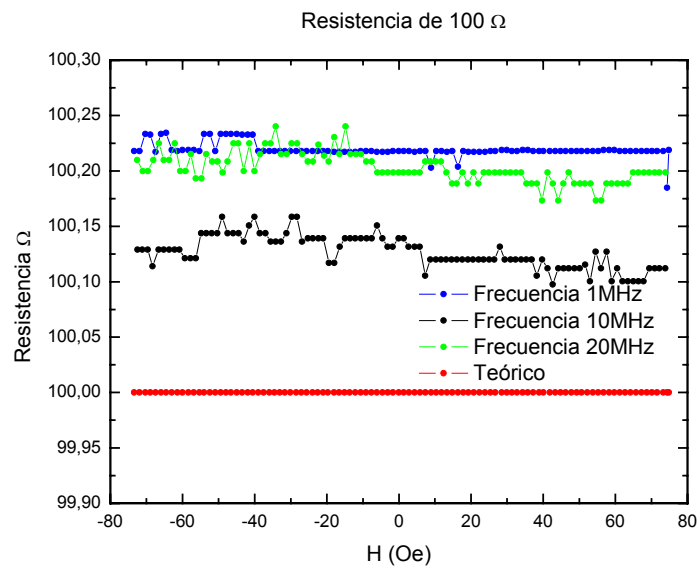


Figura 2.6 Comportamiento de una Resistencia de 100 Ω para diversos valores de frecuencia variando campo magnético externo.

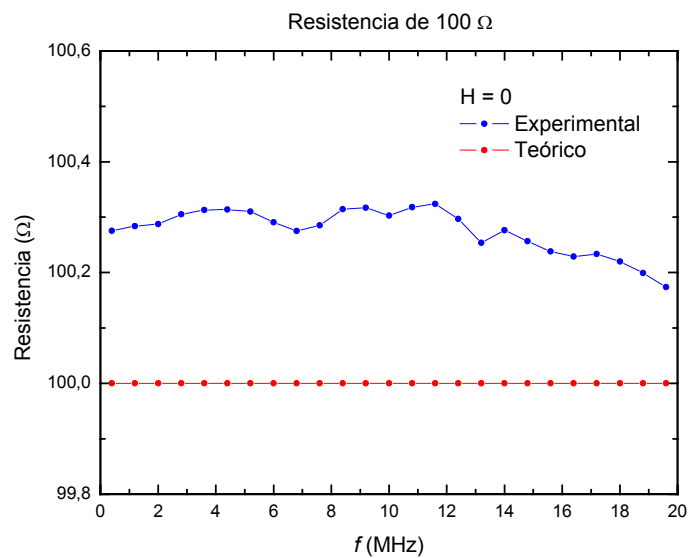
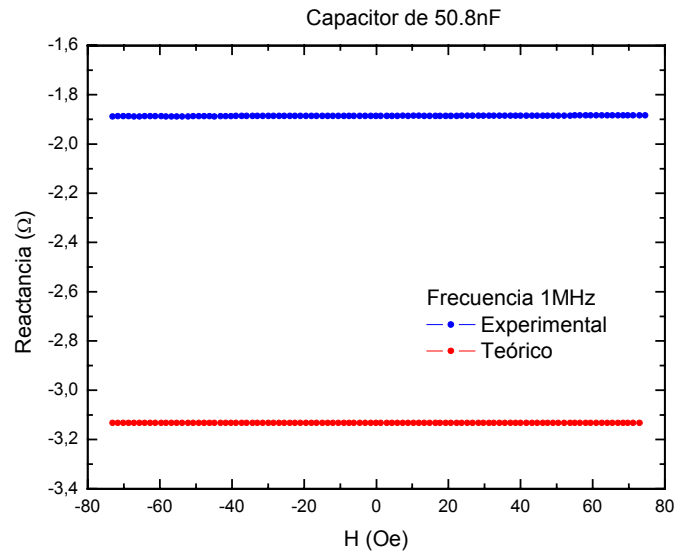


Figura 2.7 Comportamiento de una Resistencia de 100 Ω en función de la frecuencia, en ausencia de campo magnético externo H_0 .

Prueba 2: Como muestra patrón se empleó un capacitor de 50nF de tantalio. En la figura 2.8 se observa el comportamiento de la reactancia del capacitor utilizado para diversos valores de frecuencia, variando el campo magnético externo. Para calcular el valor teórico de la reactancia se utilizó la expresión:

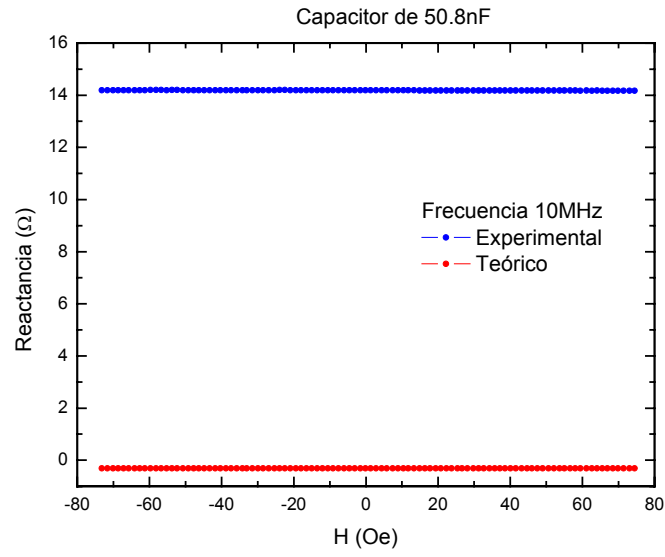
$$X_C = -(2\pi fC)^{-1} \quad (2.8)$$

En la figura 2.8, la reactancia teórica calculada por medio de la ecuación (2.8) es de -3.1Ω , y la medida se mantuvo al rededor de los -1.9Ω a $f = 1 \text{ MHz}$ en el caso (a), en el (b) el calculado es de -0.31Ω y el medido 14.2Ω a $f = 10 \text{ MHz}$, y en caso (c) el teórico fue -0.15Ω y el experimental 27Ω a $f = 20 \text{ MHz}$. A medida que la frecuencia es mayor, el error entre el valor medido experimentalmente y el calculado va aumentando. Esto es debido a la acción de las inductancias parásitas presentes en el capacitor, comportamiento ilustrado con mayor detalle en la figura 2.9. Por otro lado, en ninguno de los casos el valor de la reactancia se altero por la acción del campo magnético externo H_0 .

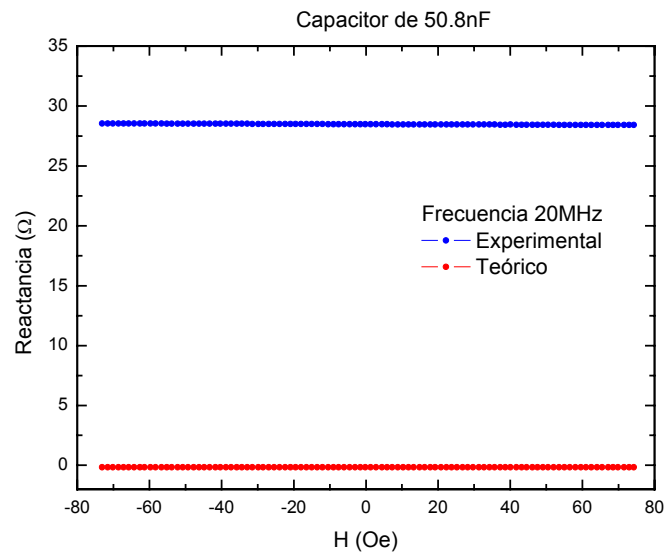


(a)

Figura 2.8 Comportamiento de un Capacitor de 50 nF en función del campo magnético externo: (a) $f = 1 \text{ MHz}$, (b) $f = 10 \text{ MHz}$ y (c) $f = 20 \text{ MHz}$.

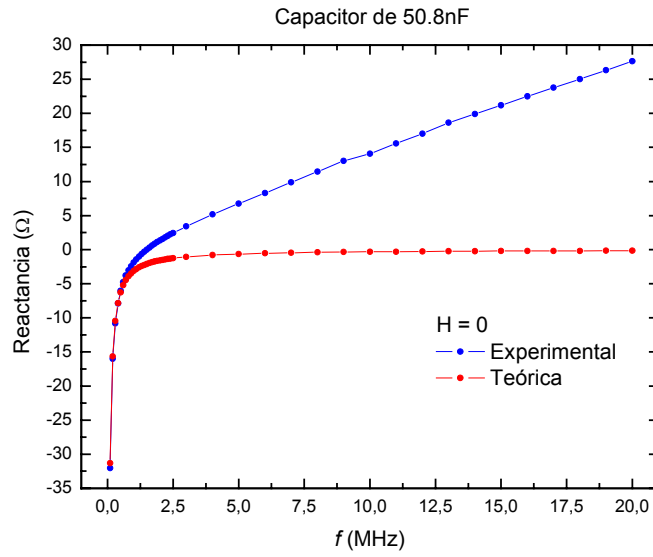


(b)

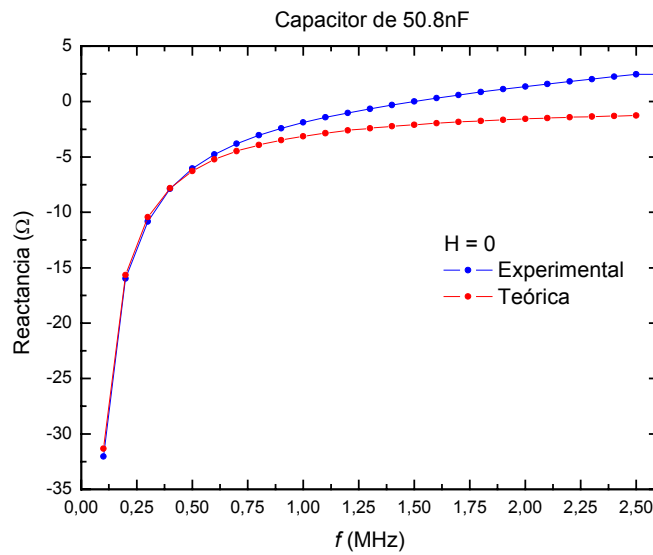


(c)

Figura 2.8 Comportamiento de un Capacitor de 50 nF en función del campo magnético externo: (a) $f= 1$ MHz, (b) $f= 10$ MHz y (c) $f= 20$ MHz.



(a)



(b)

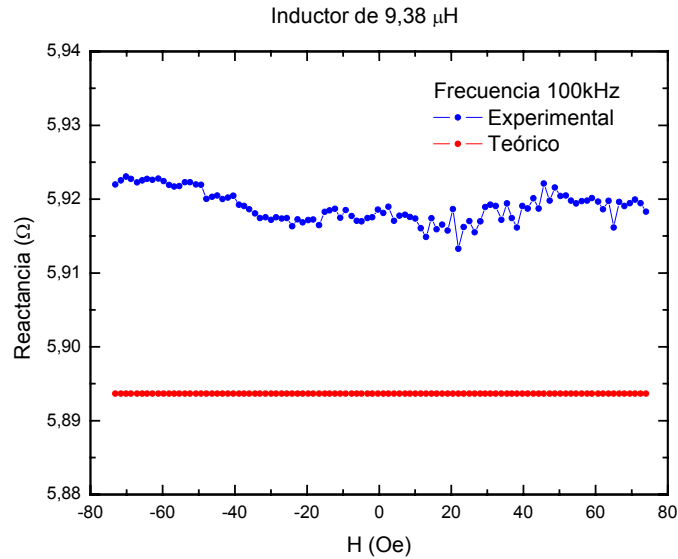
Figura 2.9 Comportamiento de un Capacitor de 50nF vs. frecuencia, en ausencia de campo magnético externo H_0 : (a) frecuencia entre 0.1 MHz y 20 MHz, y (b) entre 0.1 MHz y 2.5 MHz.

El comportamiento de la reactancia respecto a la frecuencia, se ilustra en la figura 2.9. En frecuencias superiores a 500 kHz, se observa que la curva experimental obtenida empieza a desviarse de la teórica obtenida según la ecuación (2.8), comportamiento esperado según la figura 2.8.

Prueba 3: En esta prueba se empleo una inductancia de $9.38\mu\text{H}$, con núcleo de aire. El valor teórico de la reactancia se calculo por medio de la ecuación (2.9).

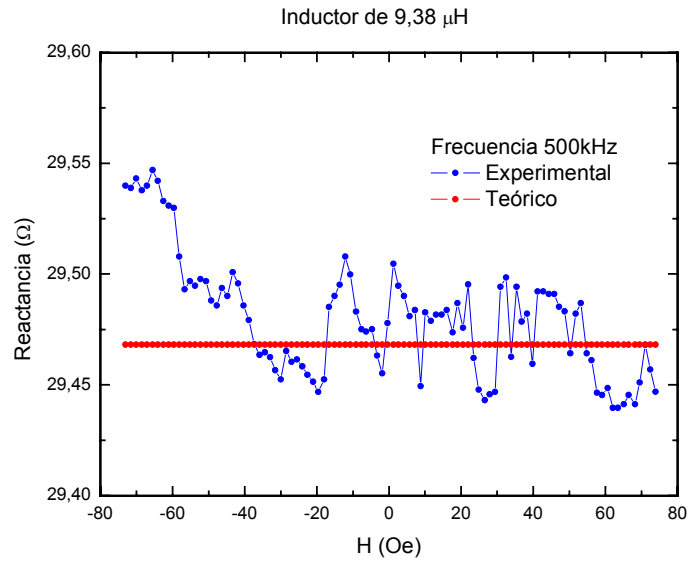
$$X_L = 2\pi fL \quad (2.9)$$

En la figura 2.10 se muestra el comportamiento de la reactancia en función del campo magnético externo. En el caso (a), el valor de la reactancia se mantuvo alrededor de los $5.92\ \Omega$, mientras el valor teórico calculado fue de $5.89\ \Omega$ a $f = 100\ \text{kHz}$, en (b) el calculado es de $29.46\ \Omega$ y el medido $29.5\ \Omega$ a $f = 500\ \text{kHz}$, y en caso (c) el teórico fue $58.9\ \Omega$ y el experimental $56.9\ \Omega$ a $f = 1\ \text{MHz}$. En ninguno de los casos se presenta alteración de la reactancia por la presencia del campo magnético externo.

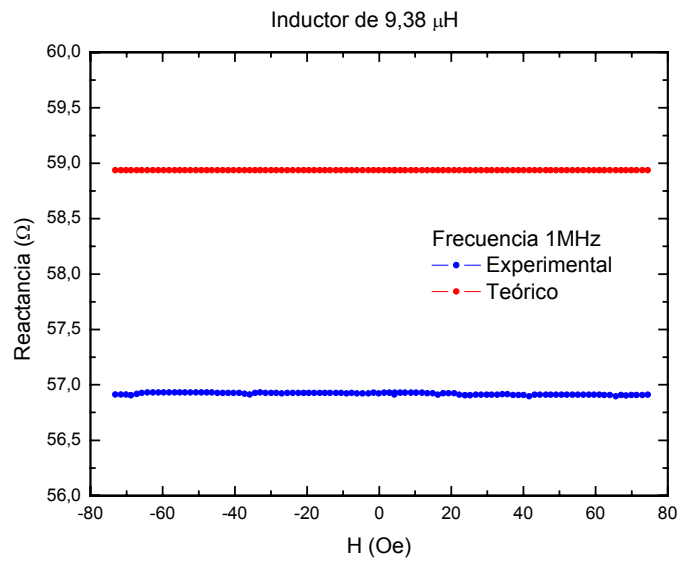


(a)

Figura 2.10 Comportamiento de una Inductancia de $9.38\ \mu\text{H}$ en función del campo magnético externo: (a) $f = 100\ \text{kHz}$, (b) $f = 500\ \text{kHz}$ y (c) $f = 1\ \text{MHz}$.



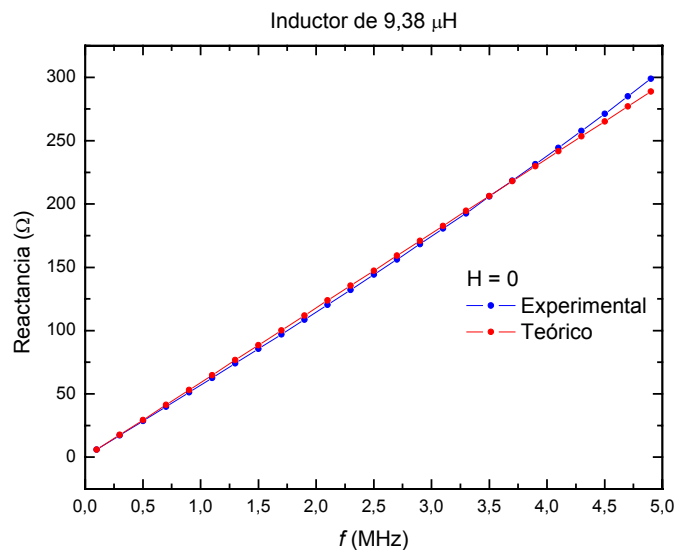
(b)



(c)

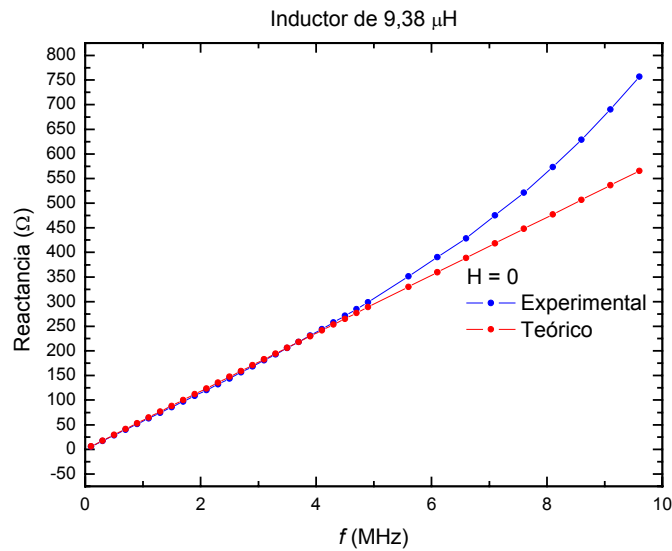
Figura 2.10 Comportamiento de una Inductancia de 9.38 μH en función del campo magnético externo: (a) $f = 100 \text{ kHz}$, (b) $f = 500 \text{ kHz}$ y (c) $f = 1 \text{ MHz}$.

En la curva de la reactancia en función de la frecuencia a campo magnético externo $H_0 = 40$ Oe, mostrada en la figura 2.11(a), se ilustra el comportamiento lineal según la ecuación (2.9). Sin embargo la reactancia medida no es completamente lineal, e incluso a frecuencias mayores a 4.2 MHz la curva experimental empieza a tener un distanciamiento pronunciado de la teórica. Esta no linealidad en la curva experimental se debe a la presencia de capacitancias parásitas en las inductancias reales. En la figura 2.11(b) se observa con mayor claridad esta no linealidad y como la curva experimental ve en busca del pico de resonancia del circuito equivalente formado por la inductancia y sus capacitancias parásitas [8].



(a)

Figura 2.11 Comportamiento de una Inductancia de 9.38 μH respecto a la frecuencia, en campo magnético externo $H_0 = 40$ Oe: (a) frecuencia entre 0.1 MHz y 5 MHz, y (b) entre 0.1 MHz y 10 MHz.



(b)

Figura 2.11 Comportamiento de una Inductancia de $9.38 \mu\text{H}$ respecto a la frecuencia, en campo magnético externo $H_0 = 40 \text{ Oe}$: (a) frecuencia entre 0.1 MHz y 5 MHz , y (b) entre 0.1 MHz y 10 MHz .

En general, los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en diferentes componentes eléctricos pasivos, permitieron establecer las primeras características funcionales como estabilidad temporal en el comportamiento del sistema, confiabilidad en la transferencia de datos, reproducibilidad y la presencia de una baja dispersión ($<1\%$) en las diferentes medidas realizadas.

2.1.4 Posibles mejoras y otras aplicaciones

Una de las posibles mejoras que se podría realizar al sistema desarrollado, sería adecuando esté con una sonda capaz de medir con exactitud la corriente que circula por la muestra. Así, se podría controlar la amplitud de la corriente que se suministra a la muestra a estudiar durante la medición de la magnetoimpedancia, y además se podría prescindir de la

resistencia que se conecta en serie con la muestra, ya que la impedancia en la muestra estaría dada por la siguiente expresión:

$$Z \angle \alpha = \frac{V \angle 0^\circ}{I \angle \theta}, \quad (2.8)$$

donde I es la corriente que circula por la muestra con un ángulo de desfase θ respecto a la señal voltaje aplicada V . Tanto la amplitud de la corriente I y como el ángulo de desfase θ las mediría la sonda de corriente. Las componentes real e imaginaria de la impedancia se calcularían por medio de las ecuaciones (2.6) y (2.7).

Por otro lado, se podría mejorar el ancho de banda de operación del sistema, diseñando y construyendo con todas las normas necesarias para trabajar a altas frecuencias el circuito impreso ubicado en el porta-muestras, encargado de acondicionar las señales (ver sección 2.1.2). Con las anteriores modificaciones realizadas al sistema, éste se podría usar para realizar mediciones de impedancia en sistemas biológicos [9].

Referencias

- [1] S. U. Jen, Y. D. Chao. *J. Magn. Magn. Mater.*, vol **125** / **181** (1998), p. 109 - 110.
- [2] K. C. Mendes, F. L. A. Machado. *J. Magn. Magn. Mater.*, vol **177** / **181** (1998), p. 111 - 112.
- [3] S. Cesar. ***Magnetoimpedancia Gigante en CoFeSiB***. Tesis de Maestría en Física. Universidad Federal de Pernambuco. Recife, Brasil (1995).
- [4] National Semiconductor Corporation. ***National Analog and Interface Products Databook***. (1999).
- [5] OMRON Company. ***High Frequency Relay G6Y***. Dirección Internet:
[http://oeiwcscnts1.omron.com/pdfcatalog.nsf/0/4D29F4FD245FAB4E86256D350052C09A/\\$file/D20G6Y0503.pdf](http://oeiwcscnts1.omron.com/pdfcatalog.nsf/0/4D29F4FD245FAB4E86256D350052C09A/$file/D20G6Y0503.pdf)
- [6] Vishay Dale. Metal ***Film Resistors, Precision, Ultra-High Stability***. Dirección de Internet:
<http://www.vishay.com/docs/31019/ptf.pdf>
- [7] M. L. Sánchez, V. M. Prida, B. Hernando, M. Tejedor and M. Vázquez. *Recent Res. Devel. Non-Crystalline Solids*, vol. **1** (2001), p. 191 - 201.
- [8] www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/electronicaaplicadaiii/Aplicada/Anexocomponentespasivos.pdf.

-
- [9] J. O. Casas. *Contribución a la Obtención de Imágenes Paramétricas en Tomografía de Impedancia Eléctrica para la Caracterización de Tejidos Biológicos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona España (1998).

3. SÍNTESIS DE LAS MUESTRAS

La fabricación de las cintas amorfas estudiadas en este trabajo, se realizó gracias a una pasantía internacional realizada durante los meses de agosto y septiembre de 2003 en el departamento de Propiedades Ópticas, Magnéticas y de Transporte, del *Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid ICMM*, en colaboración del Doctor Manuel Vázquez. En este capítulo se describe el método utilizado para la producción de las cintas amorfas de aleación $Fe_{73.5-x}Cr_xNb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$, con $x = 0, 2, 4, 6, 8, 10$, y se enumeran las diferentes etapas para la fabricación de las mismas.

3.1 PREPARACIÓN DE ALEACIONES MAGNÉTICAS AMORFAS

Las aleaciones amorfas, a veces llamadas vidrios metálicos, han sido objeto de un exhaustivo estudio durante los últimos años, tanto al nivel teórico como experimental, debido a sus interesantes propiedades y a sus aplicaciones en nuevos dispositivos [1]. Estas aleaciones que pueden ser en forma de cinta, de hilo, de capa fina y de microhilo recubierto de vidrio, se obtienen por métodos de solidificación rápida “SR” (taza de enfriamiento de $\approx 10^6$ K/s) a partir de los elementos aleantes desde un gas, ión o estado fundido, los cuales son los estados ideales aleatorios a nivel atómico. De esta forma se consigue congelar la estructura del líquido en sólida, la cual presenta comportamientos electrónicos y magnéticos muy diferentes que los materiales cristalinos. Particularmente, las propiedades magnéticas de los materiales amorfos se afectan intensamente por los desordenes de los enlace químicos, los cuales causan la distribución de los momentos magnéticos y de las

interacciones de canje. Por otro lado, el campo electroestático generado es desordenado, creando anisotropías locales a través del acoplamiento de espín-orbita que conduce a la orientación variable de los momentos magnéticos. Este desorden estructural introduce unas nuevas estructuras magnéticas así como el esferomagnetismo ó magnetismo circular, que poseen un arreglo non-alinear de los momentos magnéticos.

Las composiciones que se suelen usar para generar materiales amorfos, están basadas en metales de transición 3d como el Fe, Co, Ni a los que se añaden pequeñas cantidades de metaloides como el B, Si, P ó de otros metales como el Cr, Mn, Zr, Nb, Cu, Al para ralentizar la cristalización y por lo tanto para estabilizar el estado amorfo. Generalmente, estas aleaciones exhiben excelentes propiedades magnéticamente blandas. Al carecer de estructura cristalina, estos materiales no presentan anisotropía magnetocristalina, por lo que su comportamiento magnético estará gobernado por otras anisotropías como la geometría y la magnetoelástica principalmente.

Las tensiones mecánicas propias de las aleaciones amorfas pueden relajarse calentando el material a una temperatura que permite a los átomos acercarse a sus posiciones de equilibrio. Así el material llegará a ser más blando. También, pueden inducir anisotropías a voluntad mediante tratamiento térmico con campo o con tensiones mecánicas aplicadas externamente. La estructura de dominios del material está determinada por estas anisotropías.

3.1.1 Método de solidificación rápida (SR)

La fabricación de un material amorfo por SR [1] a partir del fundido requiere someter el líquido a velocidades de enfriamiento extremadamente elevadas ($\approx 10^6$ K/s), en la zona de transición líquido-sólido. Se necesita por lo tanto una velocidad elevada de transferencia de calor a una fuente fría. Para conseguir estas rápidas transferencias de calor, o estas velocidades de enfriamiento tan elevadas, el fundido debe depositarse rápidamente sobre una superficie metálica altamente conductora, lo cual marca, como mínimo, la reducción de

una de las dimensiones del sólido enfriado, con lo cual el calor puede escapar rápidamente a través de la muestra. A partir de la fase líquida, velocidades de enfriamiento del orden de 106 grados/segundo o mayores, permiten formar aleaciones amorfas. Velocidades entre 106 y 102 grados/segundo producen aleaciones cristalinas que, en función del tamaño medio pueden ser micro o nanocristalinas. Hasta el presente, se han desarrollado diversas técnicas para producir enfriamientos rápidos. En todas ellas, la transferencia de calor se consigue lanzando, aplanando o pulverizando la aleación fundida para que se produzca un contacto brusco con un medio extremadamente frío. Esto implica, como mínimo, la reducción de una dimensión del sólido enfriado rápidamente, el cual adquiere forma de polvos, hilos, cintas o trozos. Cuando el producto obtenido como resultado de un proceso de SR es en forma de polvo, se dice que se ha empleado una técnica de atomización. La obtención de polvos amorfos requiere utilizar un fluido (generalmente agua o gas) para poder alcanzar velocidades de enfriamiento suficientemente elevadas.

Las técnicas de SR se caracterizan por una velocidad de enfriamiento en la transición líquido-sólido elevada y un intercambio térmico, por conducción, extremadamente rápido. Para que se cumplan los requisitos anteriores se han de dar las siguientes condiciones:

1. El sustrato sobre el que se efectúa el temple ha de ser un buen conductor térmico, como por ejemplo el Cu.
2. El contacto térmico entre el sustrato y el líquido ha de ser tan perfecto como sea posible (sobrepresión sobre el fundido).
3. La altura del líquido en dirección perpendicular al sustrato ha de ser tan reducida como sea posible.

Como consecuencia de las anteriores condiciones, se tiene que el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del líquido con el sustrato y el final de la solidificación ha de ser tan

corto como sea posible. Las cintas estudiadas en este trabajo, se fabricaron por medio del método de SR de “*melt spinning*” o de la rueda fría, que se describe a continuación.

3.1.2 Método de “*melt spinning*” ó de la rueda fría

El método de *melt spinning* ó de la rueda fría que se ilustra en la figura 3.1, consiste en hacer fluir una aleación fundida por inducción a través de un orificio redondo, situado en la base de un crisol (sobrepresión de un gas inerte, Argón por ejemplo) sobre la superficie circunferencial de una rueda de metal que gira rápidamente. Cuando el fundido golpea la rueda, se forma una acumulación de material en forma de cinta de ancho W_p y de longitud L_p , determinadas por la velocidad del flujo del líquido Q y la velocidad de la rueda V_r . La cinta es posteriormente extraída de la acumulación por la rueda en movimiento, y se mantiene en contacto con ella aproximadamente entre 40 y 60 grados de giro, de esta manera, la anchura de la cinta W_c es aproximadamente W_p ; entonces

$$Q = V_r \times \text{espesor} \times W_c \quad (3.1)$$

Si V_r aumenta, el espesor decrece, para que Q se mantenga constante (únicamente W_p depende estrechamente de V_r) y aumenta la velocidad de enfriamiento. Algunos valores típicos para el espesor de las cintas, velocidad de la rueda y anchura máxima son, respectivamente: espesor de las cintas de aproximadamente 15 a 100 μm , velocidad de la rueda 60 m/s y ancho máximo de aproximadamente 5 mm.

La aleación fundida es inyectada sobre una superficie conductora que gira a gran velocidad, la cual se encarga de disipar el calor del fundido, obteniéndose velocidades de enfriamiento entre 10^5 y 10^7 grados/seg.

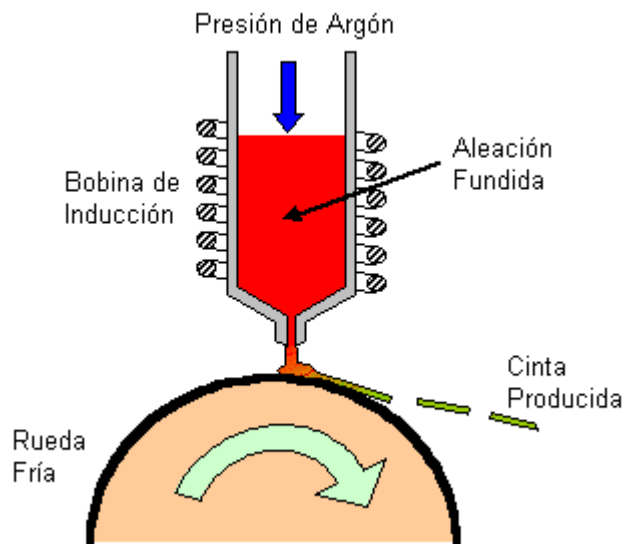


Figura 3.1 Esquema de un sistema de melt spinning.

La rueda se encuentra encerrada en una cámara donde antes de empezar el proceso de producción, se efectúa vacío y luego se inyecta gas de Argón. La rueda es movida por un motor trifásico Δ/Y a unas 95 revoluciones por segundo aproximadamente. En las figuras 3.2 y 3.3 se muestran las imágenes de un sistema para la fabricación de cintas por *melt spinning* y del proceso de fabricación por este método respectivamente.

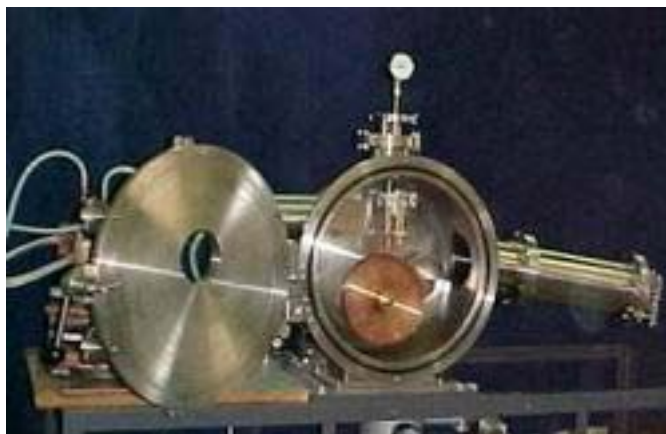


Figura 3.2 Imagen de un sistema de melt spinning.



Figura 3.3 Imagen del proceso de fabricación por melt spinning.

En los métodos continuos de fabricación de material por solidificación rápida (hilos o cintas), existe una gran variedad de parámetros experimentales, entre los que podemos destacar los siguientes: presión del sistema, sobrepresión de inyección, temperatura del líquido, material, diámetro y velocidad de la rueda, distancia crisol-rueda y geometría del crisol.

3.2 FABRICACIÓN DE LAS CINTAS AMORFAS DE COMPOSICIÓN

$Fe_{73.5-x}Cr_xNb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ **CON** $x = 0, 2, 4, 5, 6, 7, 8$ y 10 .

Se produjeron cintas amorfas de aleaciones $Fe_{73.5-x}Cr_xNb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ con $x = 0, 2, 4, 6, 8$ y 10 , con diferentes longitudes y ancho. Las composiciones usadas y el número asociado a cada cinta se presentan en la tabla 3.1.

TABLA 3.1 Composiciones y número asignado a cada cinta.

Composiciones	Valor de x	Cinta No.
$Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	0	1
$Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	10	2
$Fe_{71.5}Cr_2Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	2	3
$Fe_{69.5}Cr_4Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	4	4
$Fe_{67.5}Cr_6Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	6	5
$Fe_{65.5}Cr_8Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	8	6

Se usaron estas composiciones porque según la bibliografía la composición amorfa $Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ presenta un buen comportamiento magnético y una buena respuesta al efecto de magnetoimpedancia gigante. Sin embargo, a su vez es de interés saber en que afecta el hecho de agregar a la composición el Cr, dado que esté afecta negativamente las características magnéticas de la aleación, pero mejora el comportamiento de la magnetoimpedancia gigante en la misma. La presencia del Nb, Si y el B, son para estabilizar el estado amorfo en la aleación.

Los compuestos utilizados en la producción de las diferentes cintas amorfas son de la casa productora “Alfa Aesar” y su grado de pureza según el compuesto se muestra en la tabla 3.2.

TABLA 3.2 Compuestos utilizados y grados de pureza dados por el fabricante.

Compuesto	Grado de Pureza
<i>Fe</i>	99.97 %
<i>Cr</i>	99.99 %

<i>Nb</i>	99.8 %
<i>Cu</i>	99.95 %
<i>Si</i>	99.9999 %
<i>B</i>	99.5 %

En el proceso de producción de las cintas, en primer lugar se preparo la aleación ó pastilla madre. Para este caso se prepararon 4g por pastilla, cuyos pesos en gramos calculados [2] de los compuestos según la cinta producir, se muestran en la tabla 3.2.

TABLA 3.3 Peso en gramos de los compuestos según el valor de x para producir 4 g de aleación madre.

Cinta No.	Fe (g)	Cr (g)	Nb (g)	Cu (g)	Si (g)	B (g)
1	3.41938	0.0	0.1299	0.0529	0.3155	0.0811
2	2.978	0.4368	0.131	0.053	0.3182	0.0818
3	3.3325	0.0868	0.1301	0.053	0.3161	0.0812
4	3.2445	0.1738	0.1304	0.0531	0.3166	0.0814
5	3.1562	0.2612	0.1306	0.0532	0.3171	0.0815
6	3.0676	0.3489	0.1308	0.0532	0.3176	0.0816

Las aleaciones madre se obtuvieron mezclando todos los compuestos por cinta y fundiéndolos posteriormente en un horno de arco. El proceso de fundición se realizó a unos 2500 °C y bajo atmósfera de argón.

Una vez obtenidas las pastillas madre, se procede a la fabricación de las cintas, por el proceso de *melt spinning* descrito en la sección 3.1.1. Se obtuvieron cintas con longitudes entre 1 cms a 20 cms, anchos de 0.08 mm a 5mm, y con un espesor de $\approx 120\mu\text{m}$ para su

posterior estudio del efecto de MIG. El ancho y el espesor de las cintas se midieron por medio de un micrómetro.

Referencias

- [1] Y. Makino. *Physics and Engineering Applications of Magnetism*. Edición Y. Ishikawa, N. Miura, vol 92, Tokio Japon (1991).
- [2] W. I. Masterton, E. J. Slowinski. *Química General Superior*. Editorial Interamericana, Madrid España (1974).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados y discusión de las mediciones experimentales del efecto de Magnetoimpedancia Gigante realizadas a las cintas amorfas de composición $Fe_{73.5-x}Cr_xNb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ con $x = 0, 2, 4, 6, 8$ y 10 . También se realizaron mediciones del efecto MIG sobre un microhilo de composición $Co_{80}Fe_{4.5}Si_{10}B_{1.5}Nb_4$, con el fin de comparar su respuesta y comportamiento con el de las cintas. Para observar la dependencia del efecto de MIG, respecto a las dimensiones de la cinta, como el largo y ancho, se realizaron estudios de MIG en una cinta variando su longitud y ancho. Todas las mediciones fueron hechas a temperatura ambiente en un rango de frecuencias de la señal de corriente aplicada a la muestra desde 500 kHz hasta 20 MHz, y con el campo H_0 aplicado paralelamente al sentido de la corriente, como se ilustra en la figura 4.1. Los contactos sobre las muestras fueron hechos con tinta de plata, siendo estos previamente limpiados cuidadosamente con ácido sulfúrico al 10%. Durante las medidas el intervalo de tiempo entre cada punto fue de ~ 2 s y a pasos de campo magnético de 1 Oe aproximadamente. Una medida de MIG se realizó variando campo H_0 desde -80 Oe a $+80$ Oe y $+80$ Oe a -80 Oe (ambos sentidos de variación de campo) con el fin de verificar la histéresis.

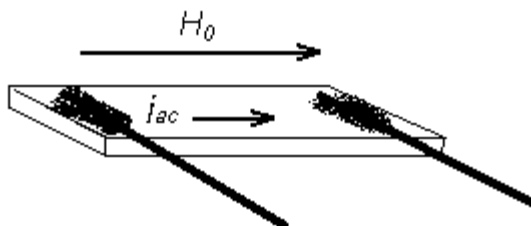


Figura 4.1 Configuración utilizada para la medición de la MIG en una muestra en forma de cinta.

Para mayor facilidad en la escritura y representación de los resultados, se le asigno un número de identificación a cada una de las cintas, como se muestra en la tabla 4.1.

TABLA 4.1 Composiciones y número asignado a cada cinta.

Composiciones	Valor de x	Cinta No.
$Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	0	1
$Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	10	2
$Fe_{71.5}Cr_2Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	2	3
$Fe_{69.5}Cr_4Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	4	4
$Fe_{67.5}Cr_6Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	6	5
$Fe_{65.5}Cr_8Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$	8	6

4.1 MEDICIONES DE MAGNETOIMPEDANCIA REALIZADAS SOBRE UN MICROHILO DE COMPOSICIÓN $Co_{80}Fe_{4.5}Si_{10}B_{1.5}Nb_4$.

Las primeras mediciones del efecto de MIG estudiado en este trabajo, se realizaron sobre un microhilo amorfo de aleación $Co_{80}Fe_{4.5}Si_{10}B_{1.5}Nb_4$ de 35 μm de diámetro fabricado por el método de solidificación rápida de “*melt extraction*” [1]. Para todas las mediciones se aplico a la muestra una corriente a campo $H_0 = 0$ de $I_{RMS} \approx 1mA$. En la figura 4.2 se ilustra la dependencia con el campo H_0 de la razón de cambio en la resistencia, la reactancia y la impedancia total, en el rango de frecuencia de 0.5 - 20 MHz para el microhilo de composición $Co_{80}Fe_{4.5}Si_{10}B_{1.5}Nb_4$, obteniéndose una razón de cambio máximo del 64% para la parte resistiva, del 260% para la reactiva y del 50% para la impedancia total. Se puede observar el gran cambio en la impedancia hasta de 10%/Oe y de 150%/Oe de cambio para la componente de reactancia. En este caso, para el rango de frecuencias estudiado, solo

se observa el comportamiento de un “*solo pico*” en $H_0 = -1.5$ Oe en la respuesta de la MIG, y se ve una alta asimetría en la respuesta. Este tipo de comportamiento recibe el nombre de magnetoimpedancia asimétrica, y es debida a las anisotropías axiales presentes en la muestra [2,3]. Otro tipo de comportamiento es el de “*dos picos*”, como se observará posteriormente en las cintas, los cuales aparecen en $H_0 = \pm H_k \neq 0$, donde H_k es el campo anisotrópico transversal [3].

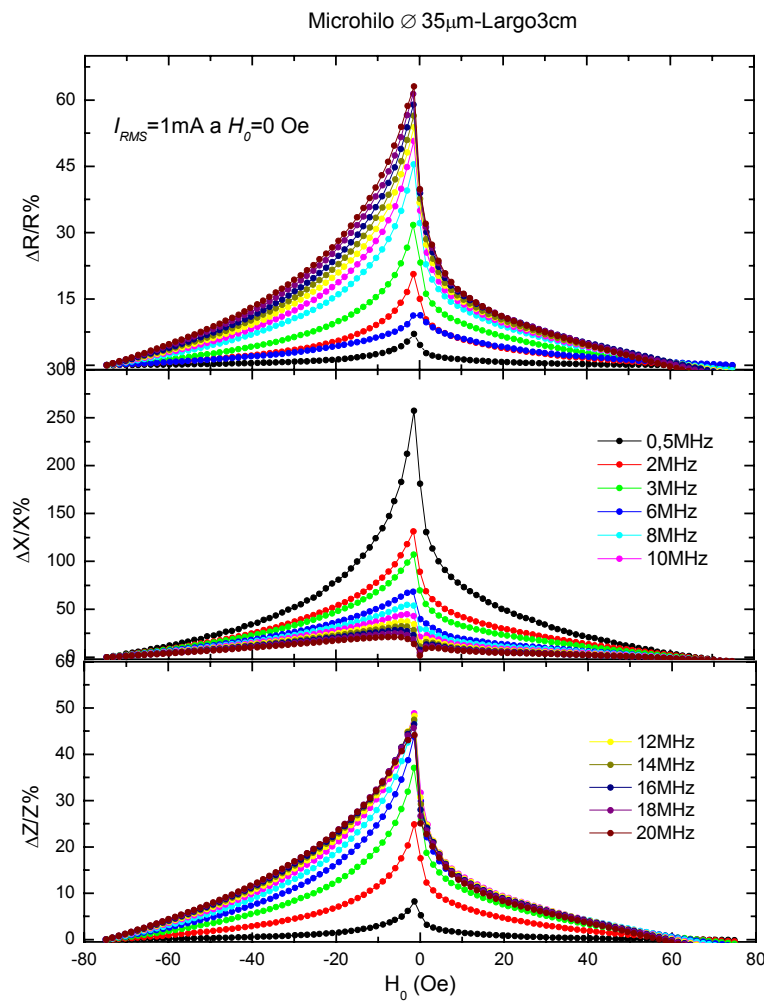


Figura 4.2 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$ en función del campo magnético en un microhilo de $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{10}\text{B}_{1.5}\text{Nb}_4$ a diferentes frecuencias.

La forma en el comportamiento de la MIG ya sea esta de un pico ó más, depende de la estructura magnética del material y del proceso de magnetización circular producida por la corriente AC que atraviesa la muestra.

En la figura 4.3(a), se ilustra el espectro de la razón de cambio de la magnetoimpedancia para el microhilo. $(\Delta Z / Z\%)_{Max}$ alcanza un máximo en $f_x = 10$ MHz, para el rango de frecuencia estudiado de 0.5 - 20 MHz. La frecuencia donde se alcanza el máximo recibe el nombre de frecuencia de relajación f_x , y es donde la permeabilidad efectiva empieza a disminuir a causa del amortiguamiento en el movimiento de las paredes de dominio [4].

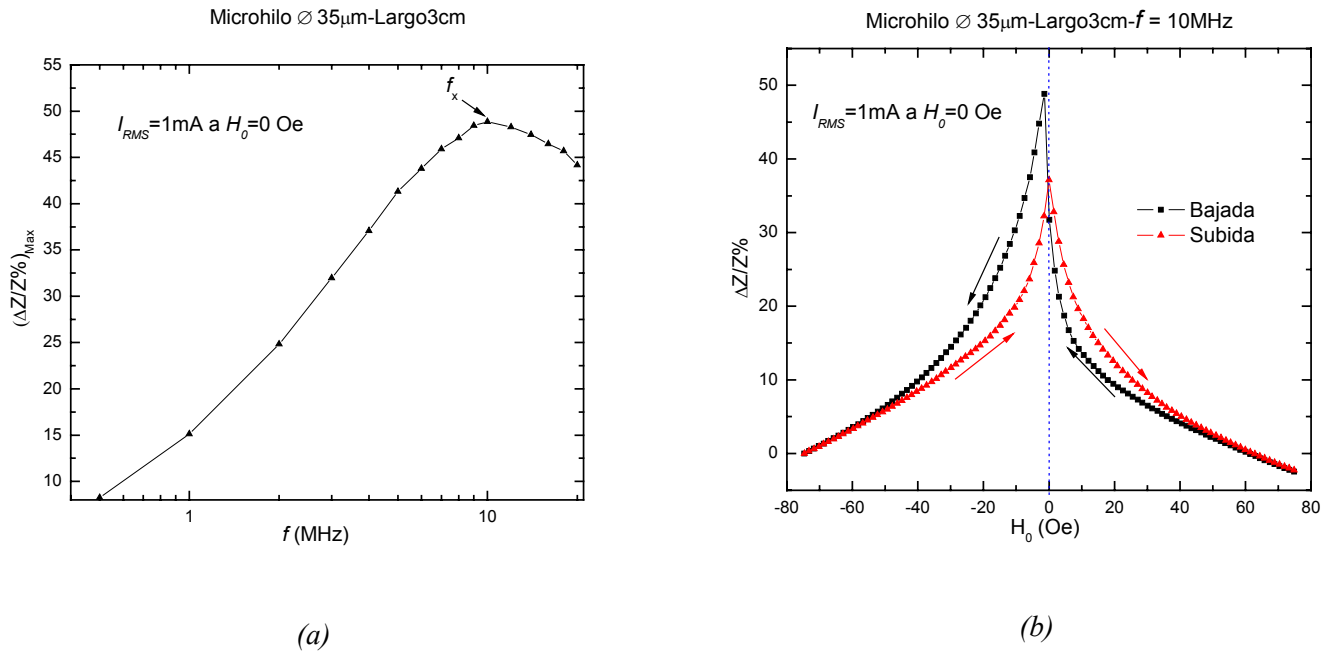


Figura 4.3 (a) espectro de la razón de cambio y (b) efecto de histéresis a $f = 10$ MHz en el comportamiento de MIG en un microhilo de composición $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{10}\text{B}_{1.5}\text{Nb}_4$.

En la figura 4.3(b), se ilustra el efecto de histéresis de la MIG en el microhilo. La magnitud del efecto de histéresis depende principalmente de la anisotropía y del proceso de

magnetización del material [5]. En este caso se observa un efecto de histéresis bastante grande a una frecuencia de 10 MHz, lo que hace a este material poco adecuada para una posible aplicación práctica.

4.2 MEDICIONES DE MAGNETOIMPEDANCIA EN CINTAS DE COMPOSICIÓN $Fe_{73.5-x}Cr_xNb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ CON $x = 0, 2, 4, 5, 6, 7, 8$ y 10.

Para el estudio de la MIG en las cintas amorfas fabricadas y poder realizar un posterior análisis por la diferencia de la concentración de Fe y Cr , las mediciones de magnetoimpedancia se realizaron bajo las mismas condiciones de temperatura, amplitud de la corriente AC, rango de frecuencia y de campo magnético H_0 . También se procuro tomar trozos de cinta con similares dimensiones como largo y ancho. Para todas las mediciones se aplico a la muestra una corriente a campo $H_0 = 0$ de $I_{RMS} \approx 1$ mA en un rango de frecuencia de 0.5 - 20 MHz. En las figuras 4.4 a la 4.15 se ilustran la dependencia con el campo H_0 de la razón de cambio en la resistencia, la reactancia y la impedancia total para la **cinta 1** a la **cinta 6** respectivamente. En la tabla 4.2 se listan algunos resultados que se deducen de estos gráficos.

TABLA 4.2 Algunos resultados del estudio de la MIG en las cintas.

Cinta No.	$(\Delta R / R\%)_{Max}$	$(\Delta X / X\%)_{Max}$	$(\Delta Z / Z\%)_{Max}$	$(\Delta Z / Z\%) / Oe_{Max}$	f_x (MHz)
1	22	50	14	1.6	6
2	25	62	15	2	6
3	19	36	11.5	1	4
4	23	62	15	1.1	4
5	18	130	14.5	1.1	8
6	17	38	10	1.7	3

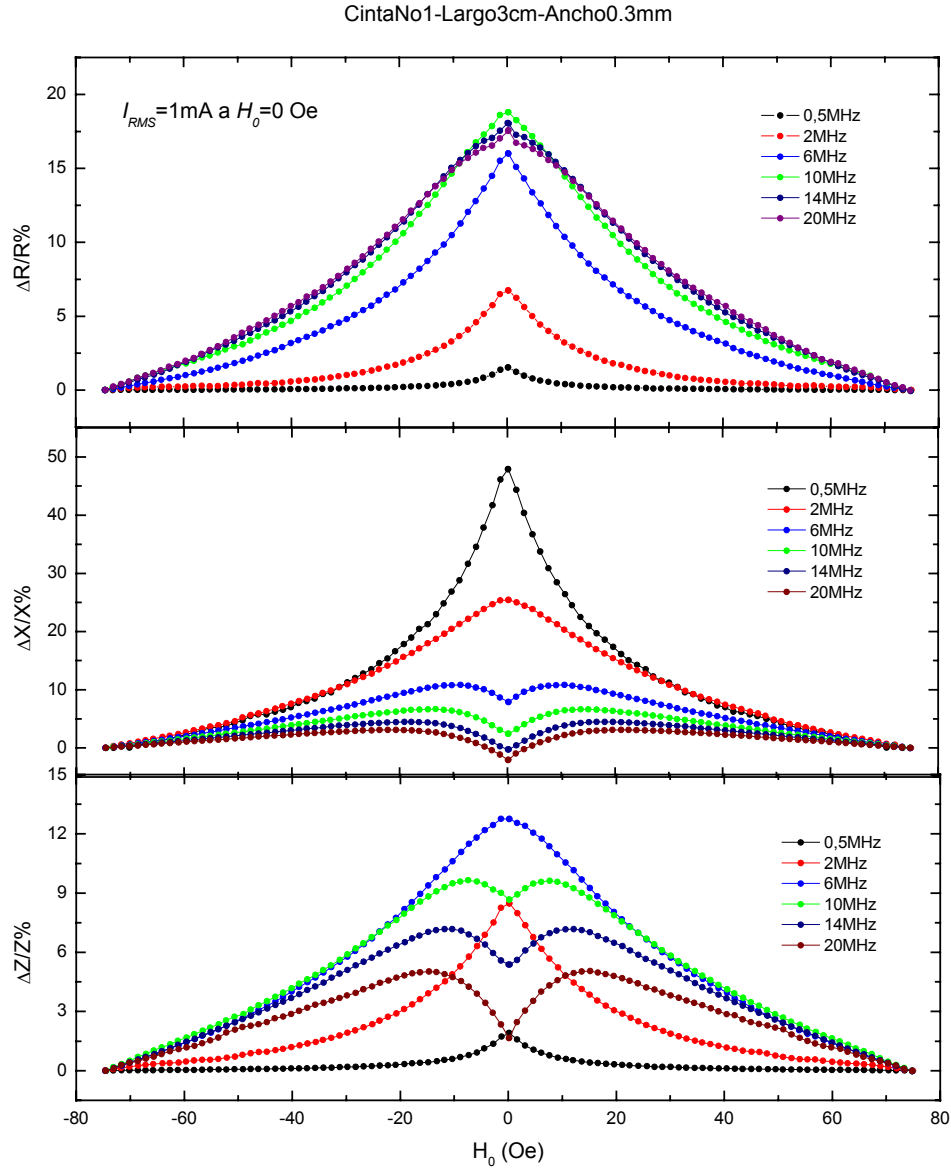


Figura 4.4 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la **cinta 1** ($\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$) a diferentes frecuencias.

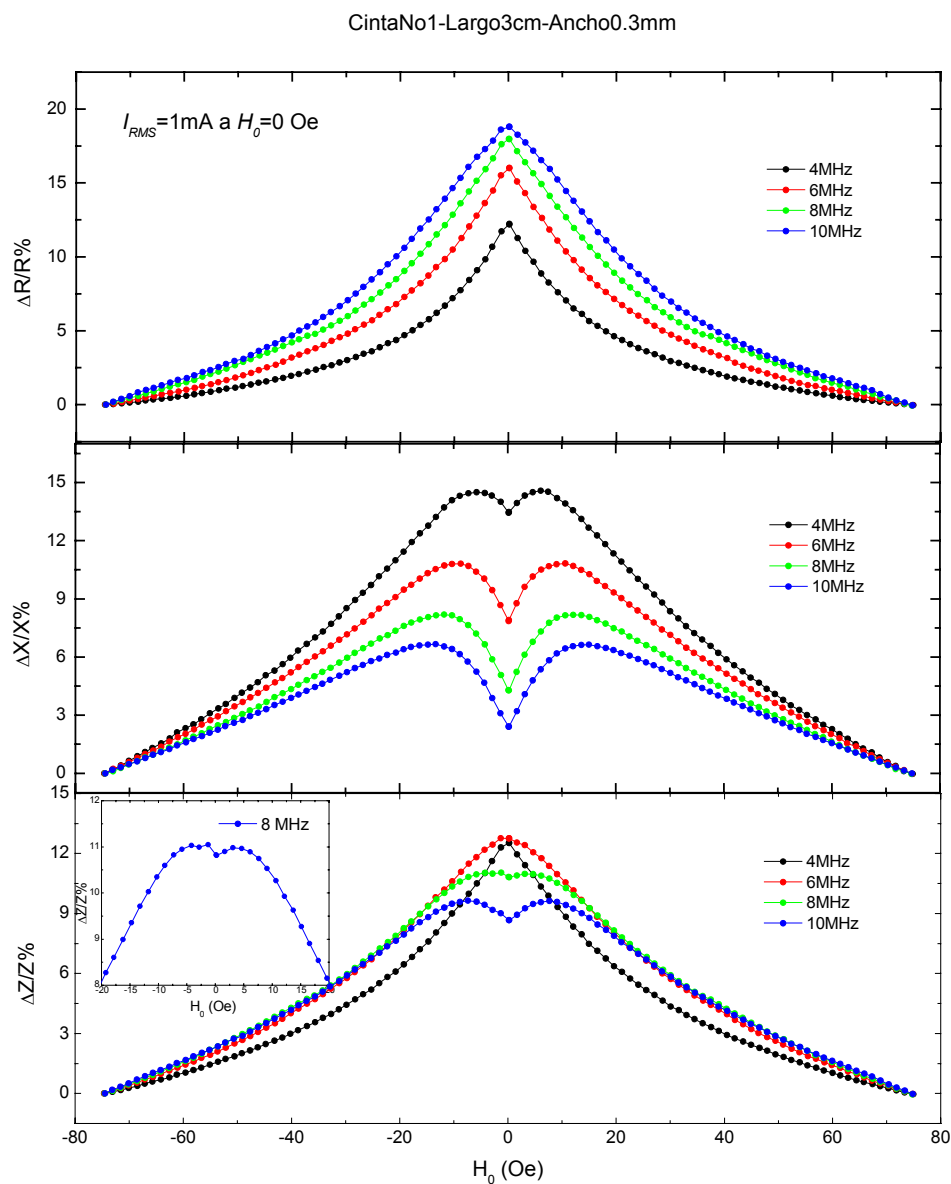


Figura 4.5 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a dos picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la **cinta 1**. Recuadro, comportamiento de tres picos.

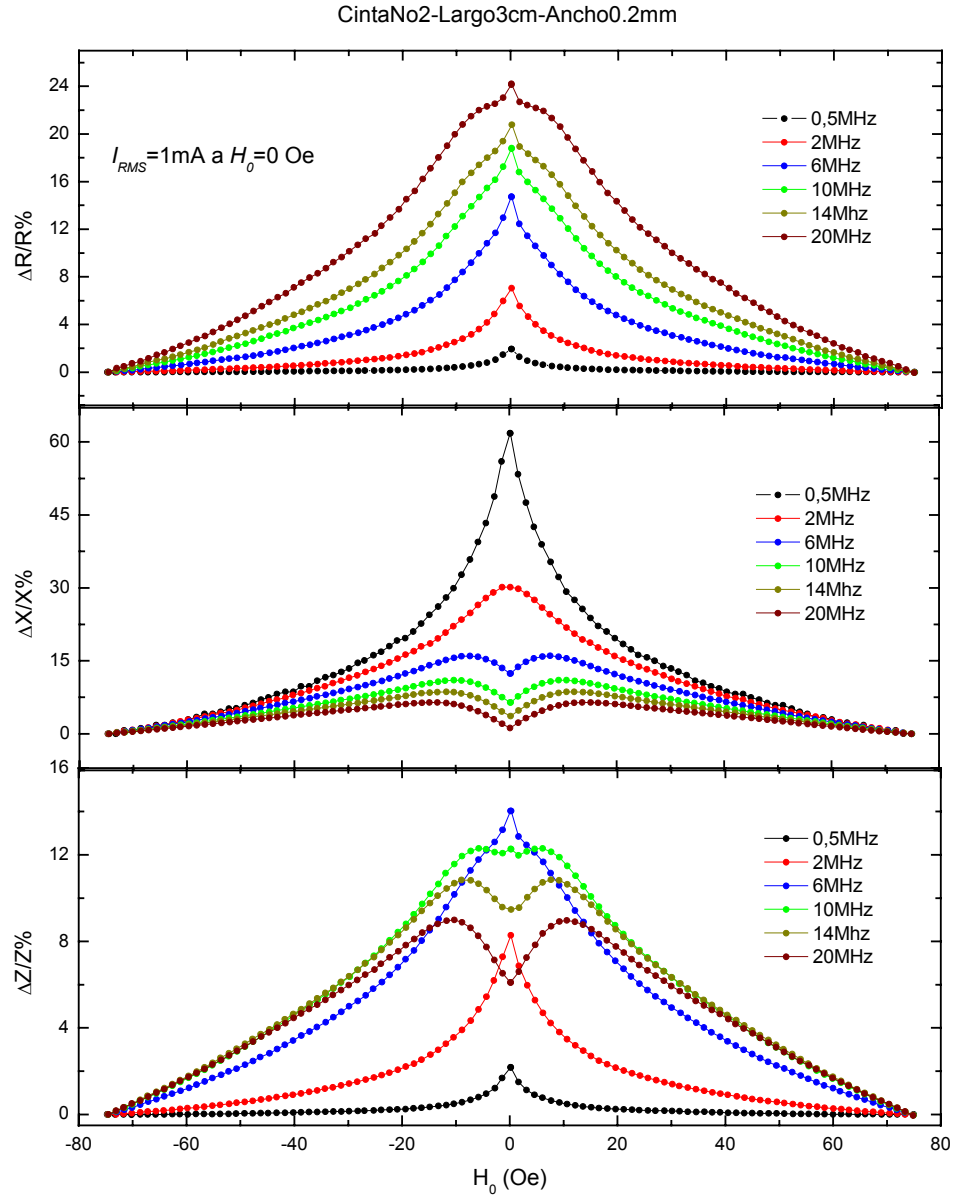


Figura 4.6 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la **cinta 2** ($Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$) a diferentes frecuencias.

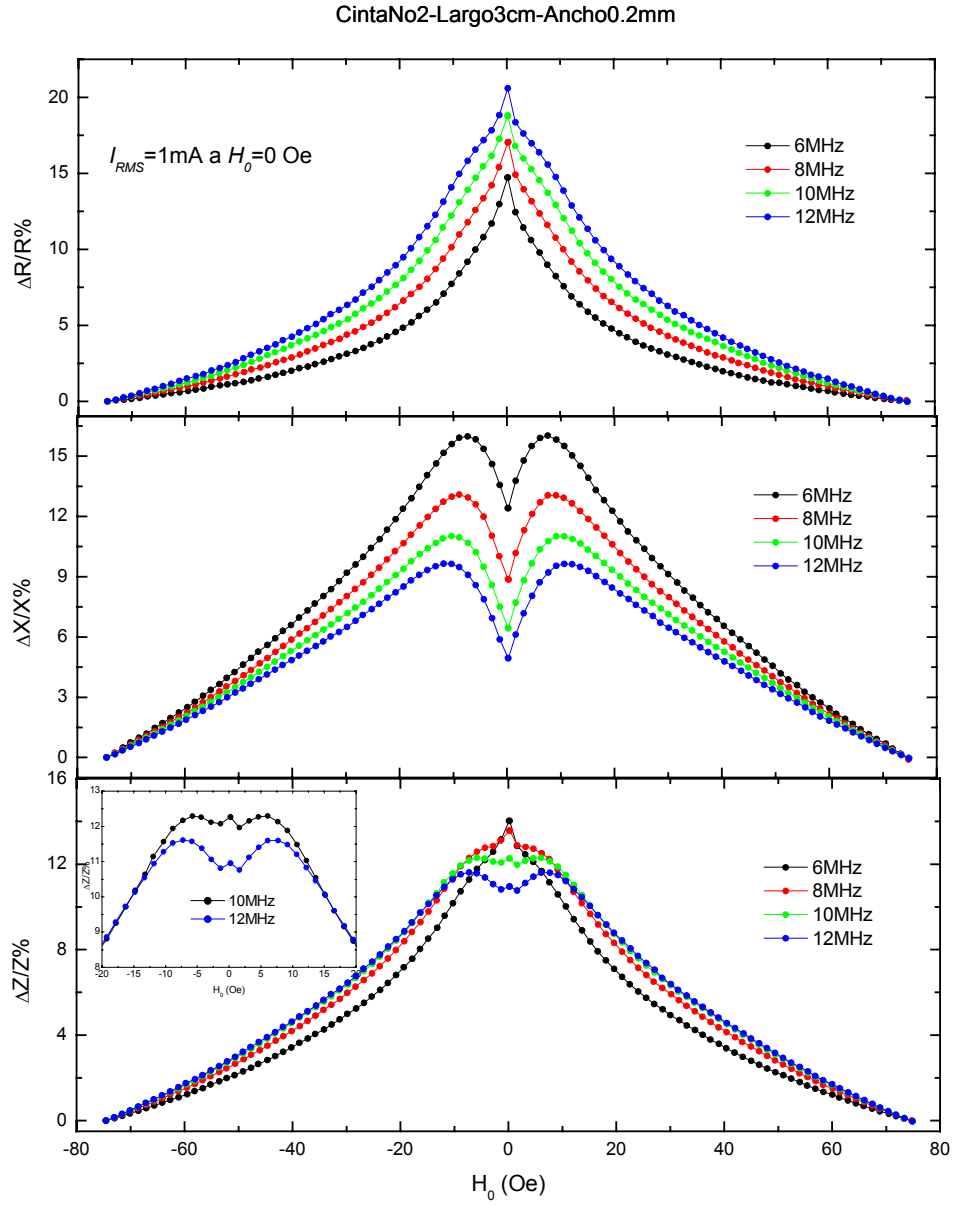


Figura 4.7 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a dos picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la **cinta 2**. Recuadro, comportamiento de tres picos.

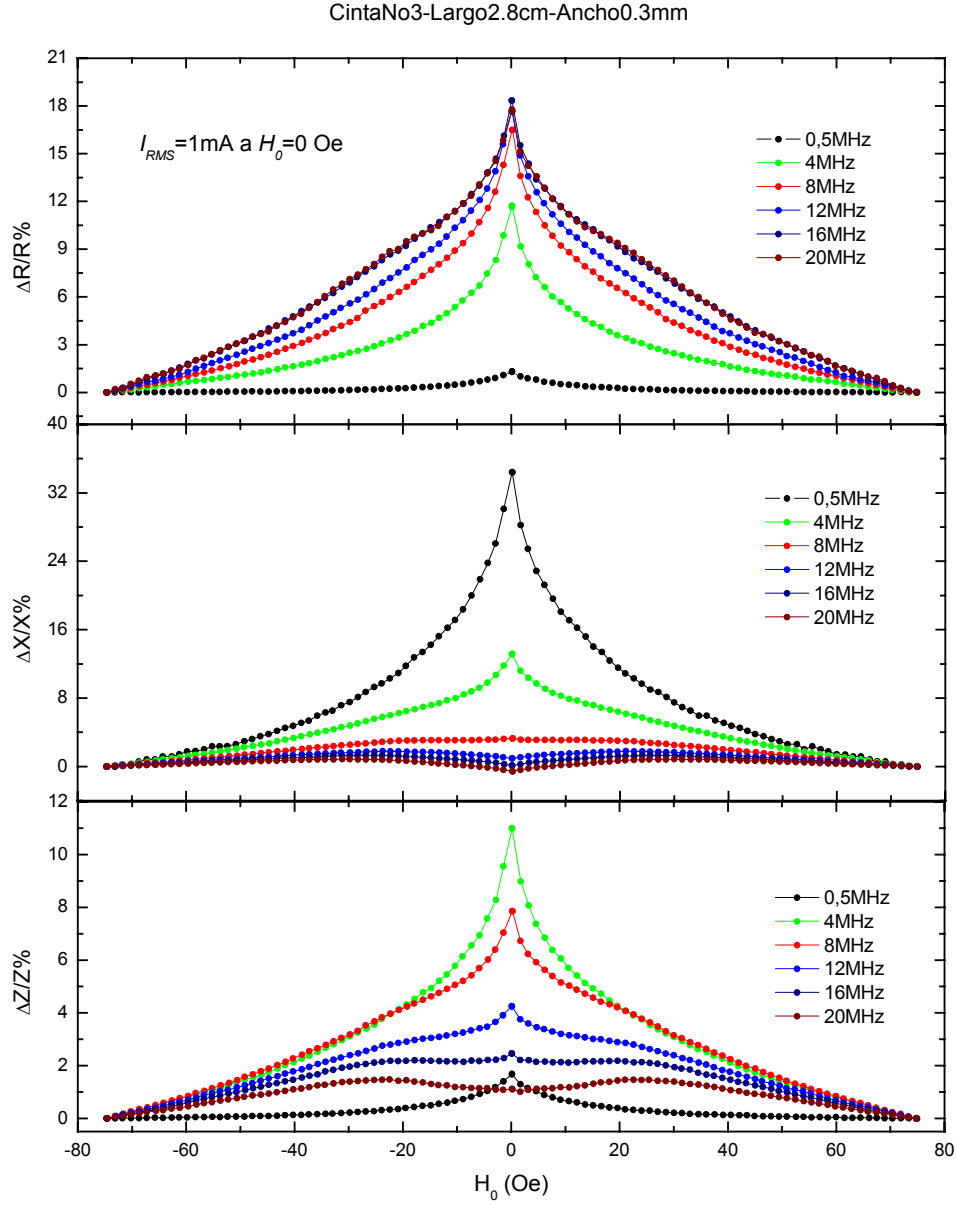


Figura 4.8 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la **cinta 3** ($Fe_{71.5}Cr_2Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$) a diferentes frecuencias.

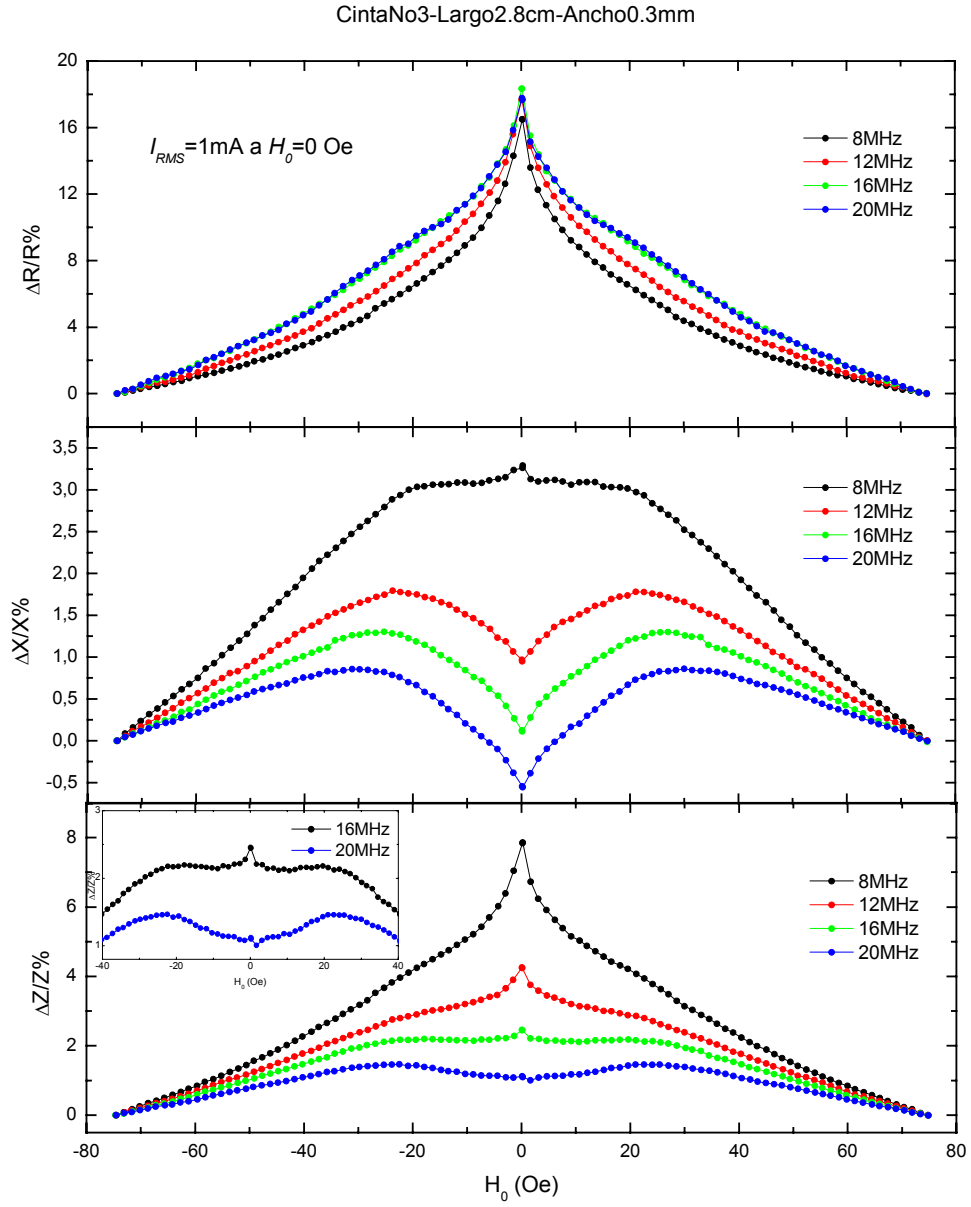


Figura 4.9 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a dos picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la **cinta 3**. Recuadro, comportamiento de tres picos.

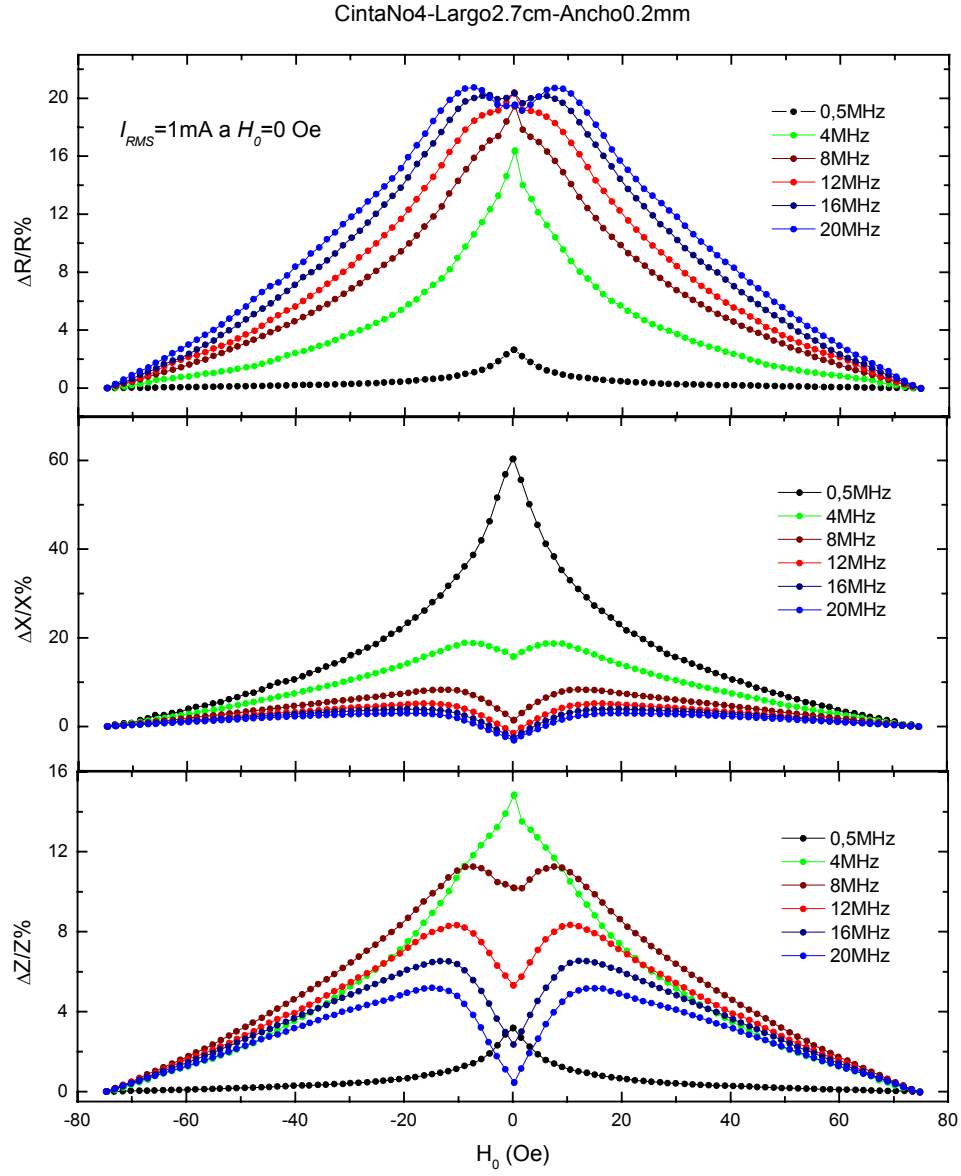


Figura 4.10 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la **cinta 4** ($Fe_{69,5}Cr_4Nb_3Cu_1Si_{13,5}B_9$) a diferentes frecuencias.

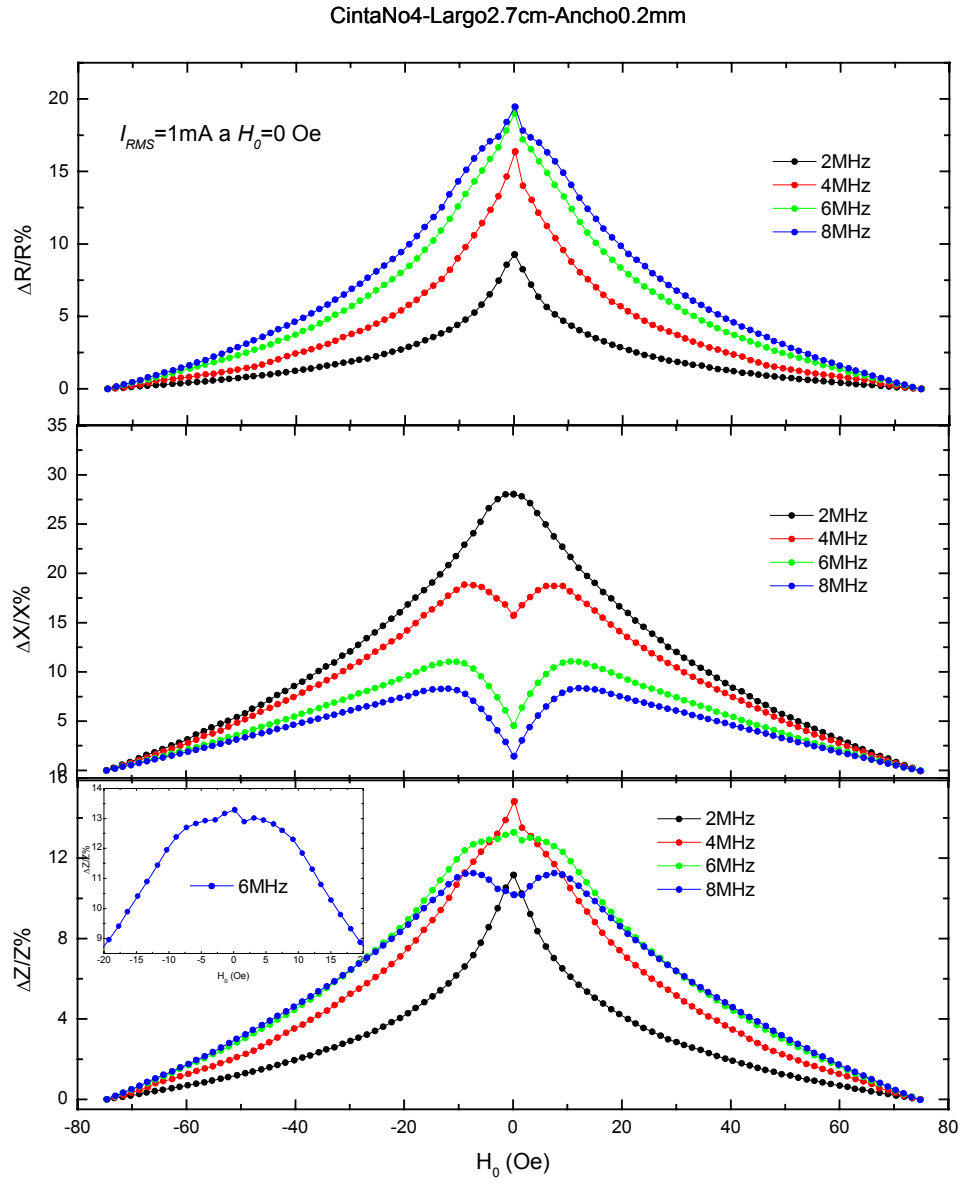


Figura 4.11 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a dos picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la **cinta 4**. Recuadro, comportamiento de tres picos.

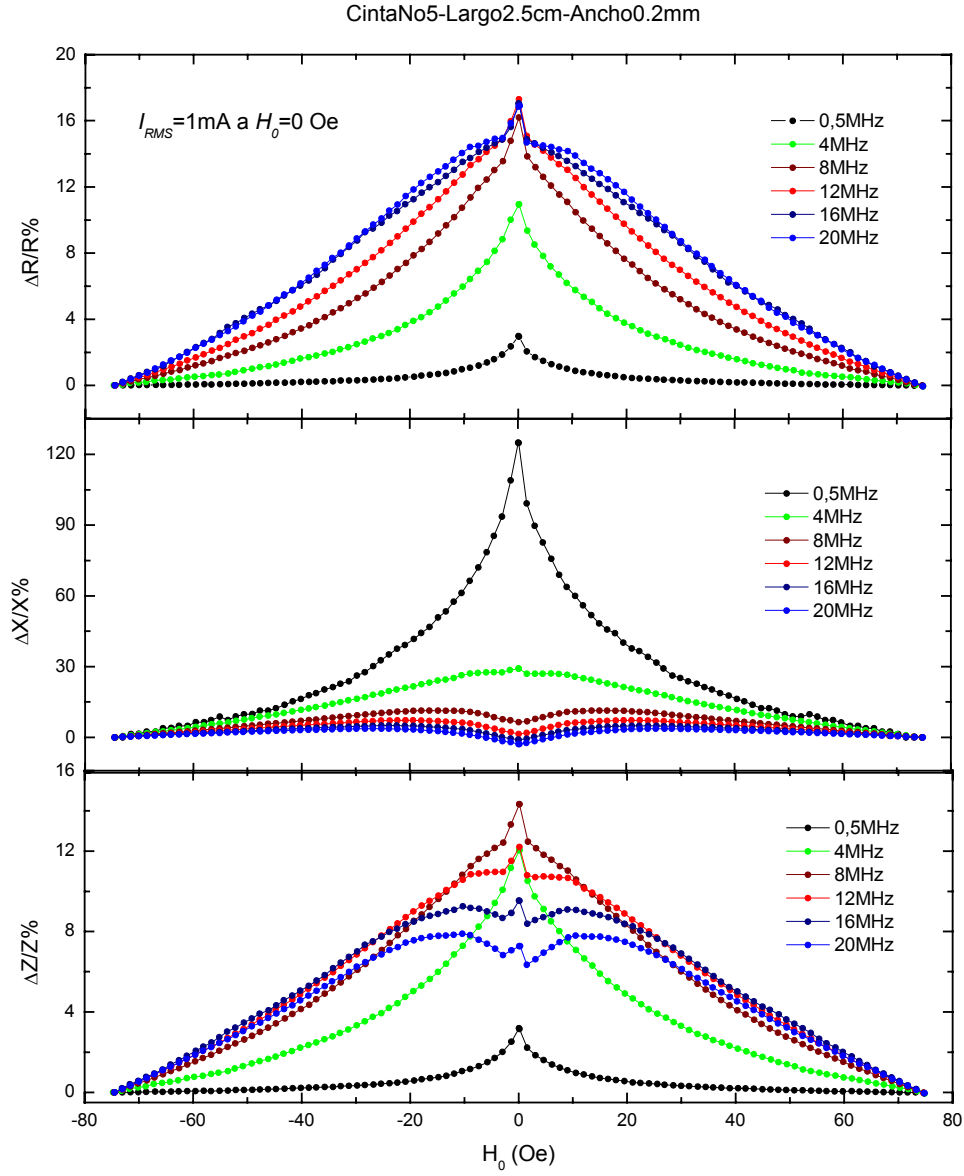


Figura 4.12 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la *cinta 5* ($\text{Fe}_{67.5}\text{Cr}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$) a diferentes frecuencias.

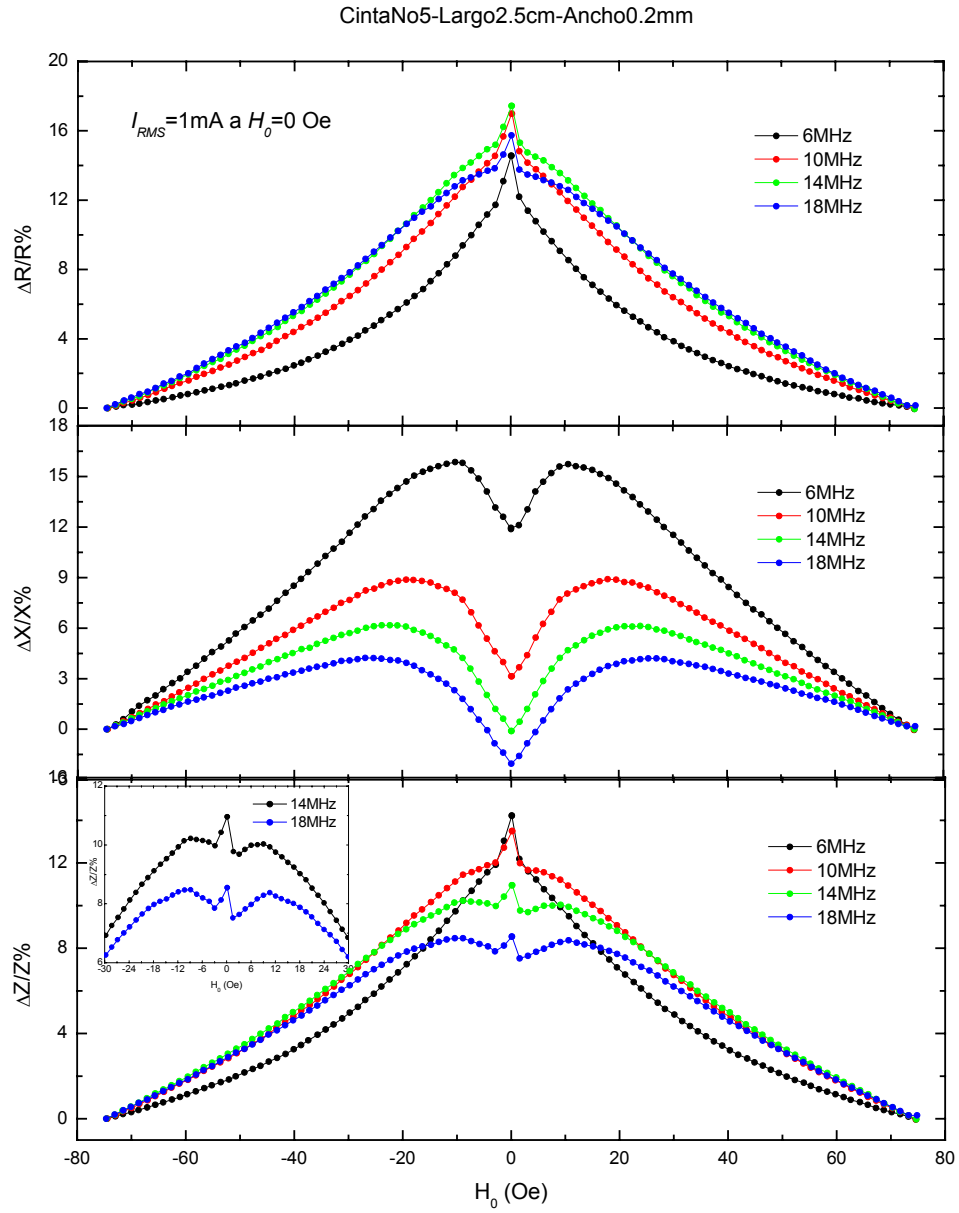


Figura 4.13 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a tres picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la **cinta5**. Recuadro, comportamiento de tres picos.

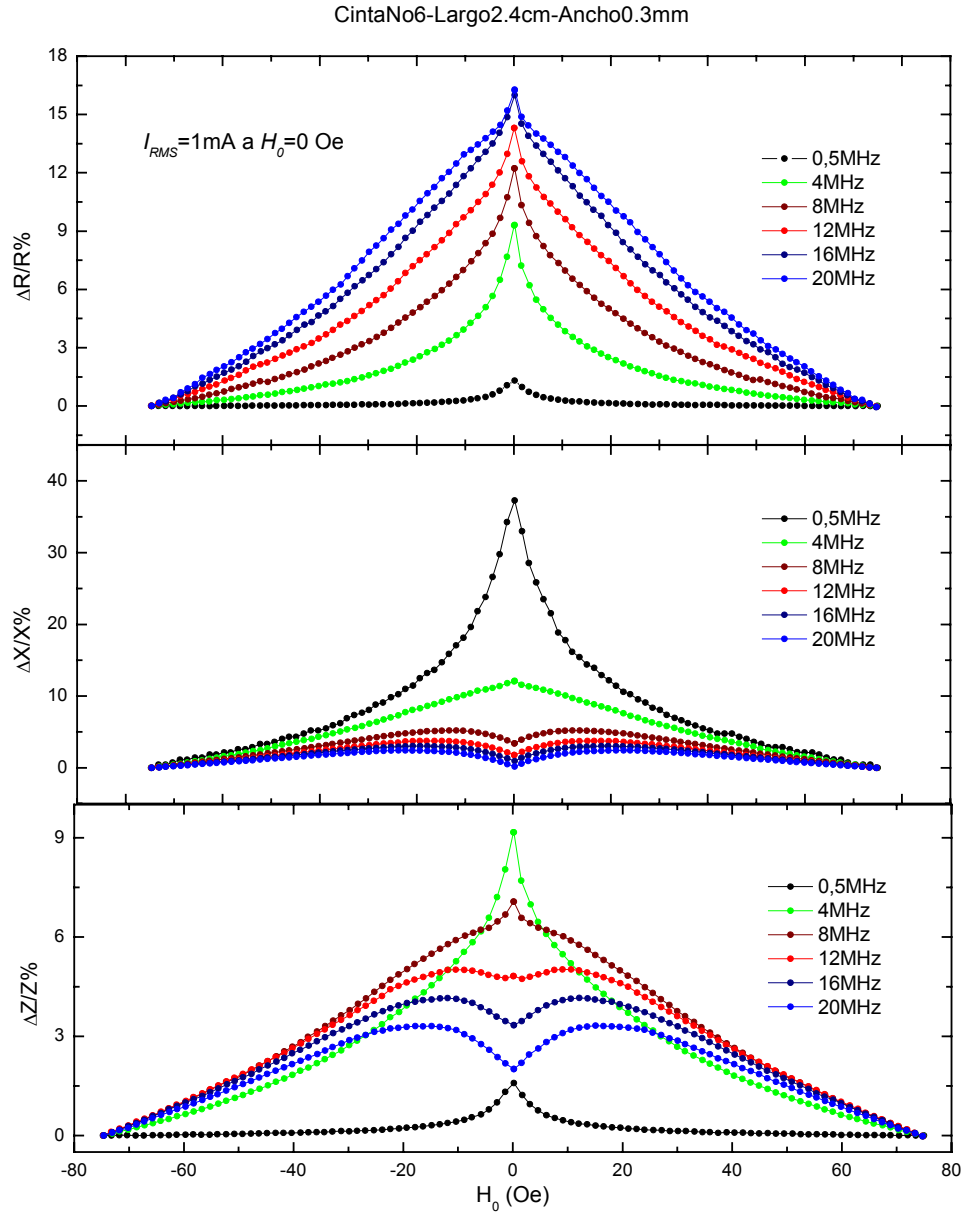


Figura 4.14 Razón de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en función del campo magnético en la **cinta 6** ($\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$) a diferentes frecuencias.

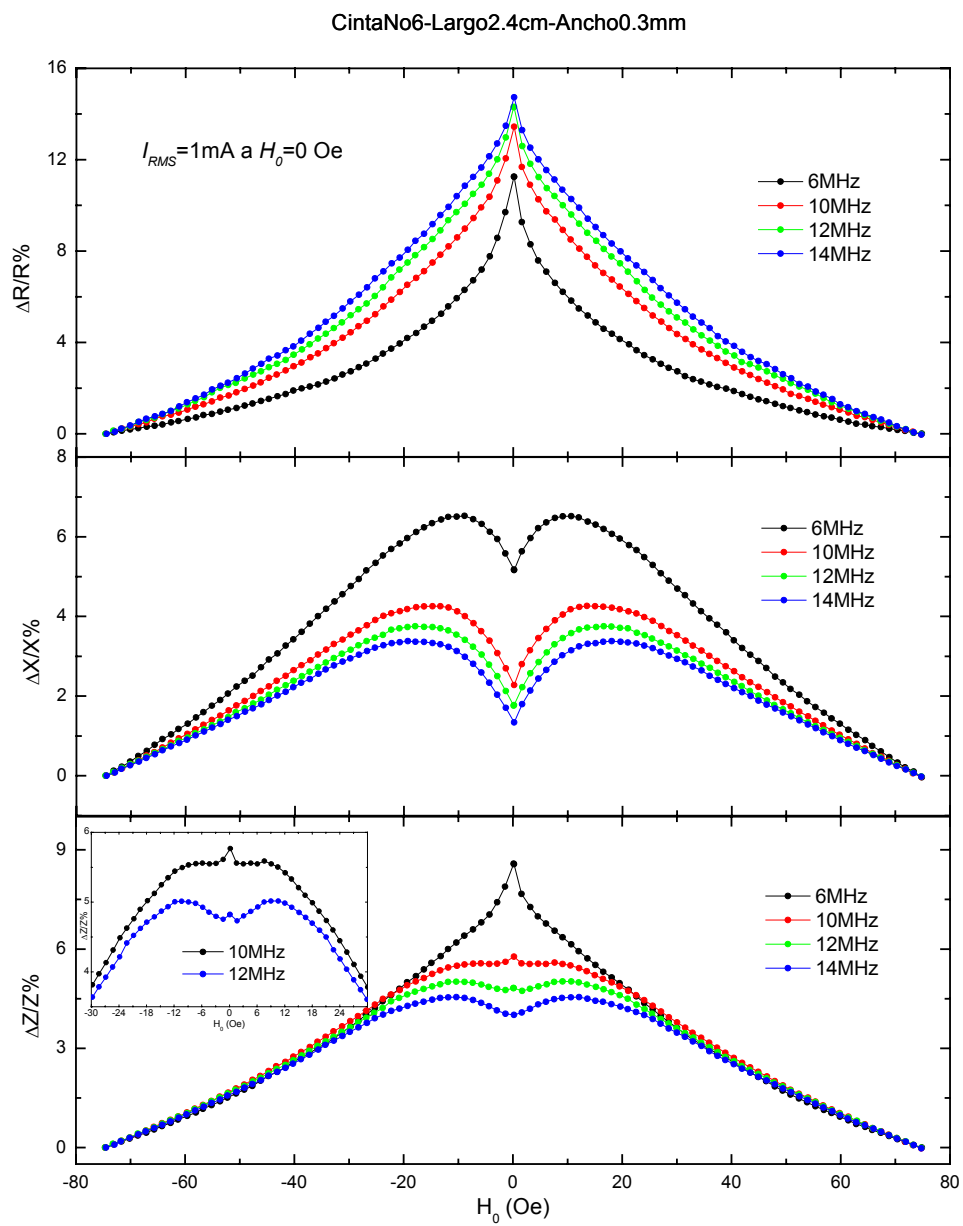


Figura 4.15 Raz3n de cambio en la resistividad $\Delta R/R$, la reactancia, $\Delta X/X$, y el cambio de uno a dos picos en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en funci3n del campo magn3tico en la **cinta 6**. Recuadro, comportamiento de tres picos.

A diferencia de la forma de la respuesta MIG del microhilo de composición $Co_{80}Fe_{4.5}Si_{10}B_{1.5}Nb_4$ estudiado en la sección anterior, las cintas exhiben un comportamiento de “uno y dos picos”, e inclusive de “tres picos”, aunque con mayor intensidad en la **cinta 5** como se puede observar en la figura 4.15. Este interesante fenómeno no ha sido observado hasta el momento, y una posible explicación al comportamiento de tres picos en la MIG podría ser la competencia entre el mecanismo del movimiento de las paredes de dominios que marca el comportamiento de un pico y el mecanismo de circulación de la magnetización que gobierna el comportamiento de dos picos a frecuencias mayores a f_x ; mecanismos podrían estar presentes con similar intensidad en el régimen de tres picos. Estos tipos de comportamiento están determinados por las contribuciones a la permeabilidad circular o efectiva por parte de la acción del movimiento de las paredes de dominio y por el proceso de la circulación de la magnetización [7], y por la presencia de una anisotropía transversal en las cintas. En todos los resultados se presenta un desplazamiento del campo magnético anisotrópico H_k desde su aparición, hacia campos mayores a medida que aumenta la frecuencia de la corriente AC. Por otro lado se puede observar que el comportamiento de dos picos aparece a diferentes frecuencias y a diversos valores de campo H_k para las diferentes cintas. El campo H_k se encuentra relacionado con la magnetostricción del material [3], lo que indica que la presencia del Cr modifica la magnetostricción de las cintas. Este parámetro de magnetostricción juega un papel muy importante en el comportamiento del efecto de MIG [3,4], de allí la gran diferencia en el comportamiento de la MIG en las diferentes cintas. Otra posible causa a tal diferencia, puede ser debida a la modificación en la estructura de dominios producida por sustitución del Fe por el Cr, lo que afecta notablemente la permeabilidad magnética y por consiguiente la impedancia, como se estudio en la sección 1.3.

En la figura 4.16, se ilustra la razón de cambio de la impedancia respecto al campo magnético H_0 a una frecuencia de 7 MHz de las cintas amorfas estudiadas. En esta gráfica se puede observar con mayor claridad la diferencia del comportamiento de MIG entre las

diferentes cintas. Aunque se presenta una similar respuesta en cuanto a la máxima razón de cambio de la impedancia entre la **cinta 2** y la **cinta 5**, existen notables diferencias en otros aspectos, como por ejemplo, el valor de campo anisotrópico H_k y el comportamiento de dos picos para la **cinta 2** y de tres picos para la **cinta 5** como se muestra en las figuras 4.6 y 4.12 respectivamente.

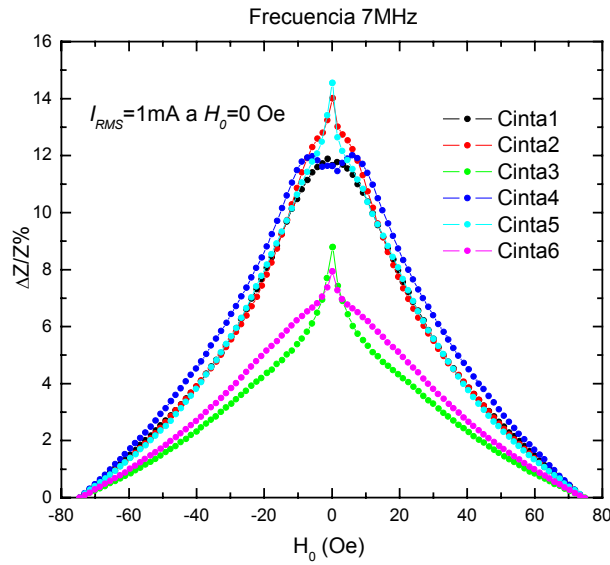


Figura 4.16 Razón de cambio de la MIG respecto al H_0 para las diferentes cintas a $f = 7$ MHz.

En la figura 4.17 se ilustra el espectro de la razón de cambio de la magnetoimpedancia para las diferentes cintas amorfas en el rango de frecuencias de 0.5 – 20 MHz, donde se pueden observar los respectivos valores en la frecuencia de relajación de cada una de las cintas, listados en la tabla 4.2. A frecuencias inferiores a f_x el proceso de magnetización es producto del movimiento de las paredes de dominio, mientras a frecuencias mayores a f_x , los movimientos de las paredes de dominio son amortiguadas y domina la magnetización circular. Así a $f < f_x$ las paredes de dominio se mueven fácilmente por la influencia del campo magnético y el amortiguamiento de las paredes de dominio a causa de las corrientes parásitas es despreciable. A $f > f_x$ los movimientos de las paredes de dominio son amortiguadas y la magnetoimpedancia solo depende del proceso de magnetización circular.

En este caso la magnetoimpedancia se incrementa con el campo H_0 hasta que el campo anisotrópico H_k es alcanzado, decayendo nuevamente con el incremento del campo magnético [4]. Lo anterior explica la aparición del comportamiento de MIG de dos picos a frecuencias mayores a f_x , como se puede constatar en las diferentes gráficas obtenidas para cada una de las cintas, como se puede observar en las figuras 4.4 a la 4.15.

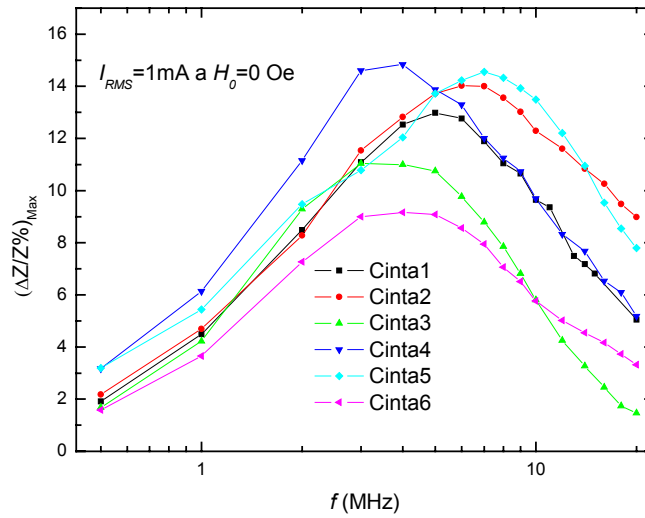


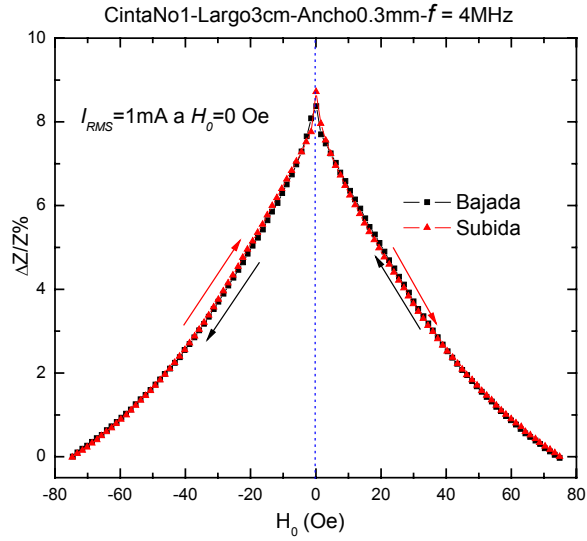
Figura 4.17 Razón de cambio de la MIG respecto a la frecuencia para las diferentes cintas.

El comportamiento de “dos o tres picos” es un factor poco útil desde un punto de vista tecnológico al momento de buscar una aplicación práctica, como se estudiará en la sección 5 de este trabajo, pero es un fenómeno muy interesante desde el punto de vista físico.

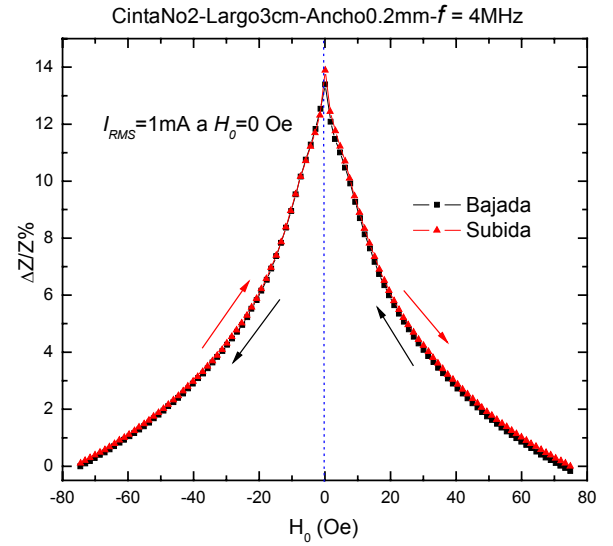
4.2.1 Histéresis y simetría en el comportamiento MIG de las cintas a 4 MHz

Como se comentó en el caso del microhilo en la sección anterior, en busca de una aplicación tecnológica, el efecto de histéresis juega un papel muy importante ya que la presencia de éste en la respuesta de la MIG de un material, aminora ostensiblemente su utilidad en una posible aplicación práctica. A diferencia de la histéresis presente en el comportamiento MIG del microhilo de $Co_{80}Fe_{4.5}Si_{10}B_{1.5}Nb_4$ mostrado en la figura 4.3(b),

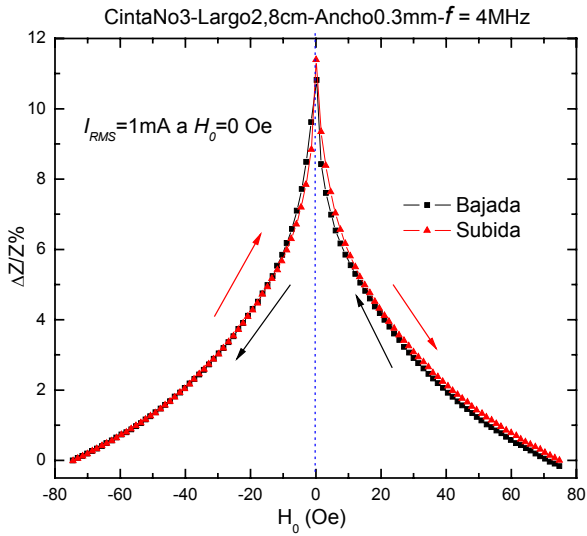
en el caso de las cintas amorfas aquí estudiadas, este efecto se ve muy disminuido como se ilustra en la figura 4.18, de allí el interés en estudiar este tipo cintas dada sus posibles aplicaciones.



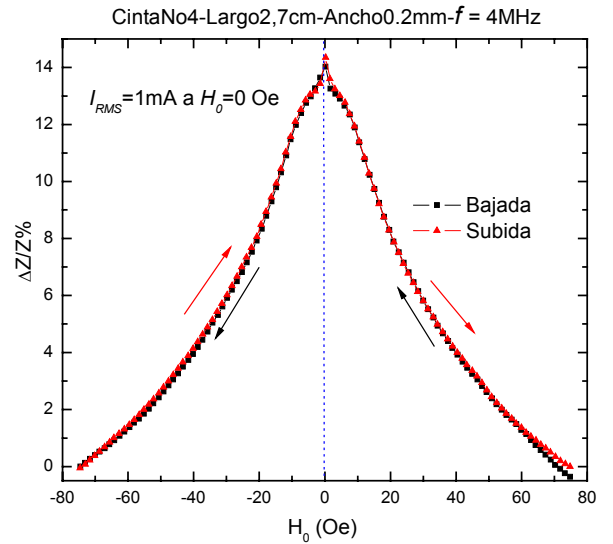
(a)



(b)

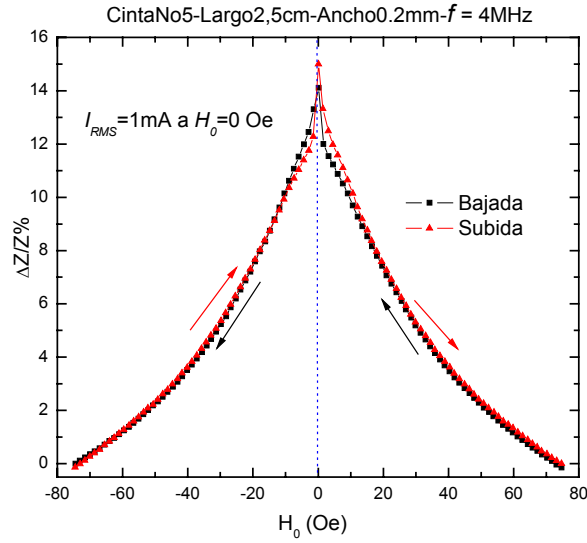


(c)

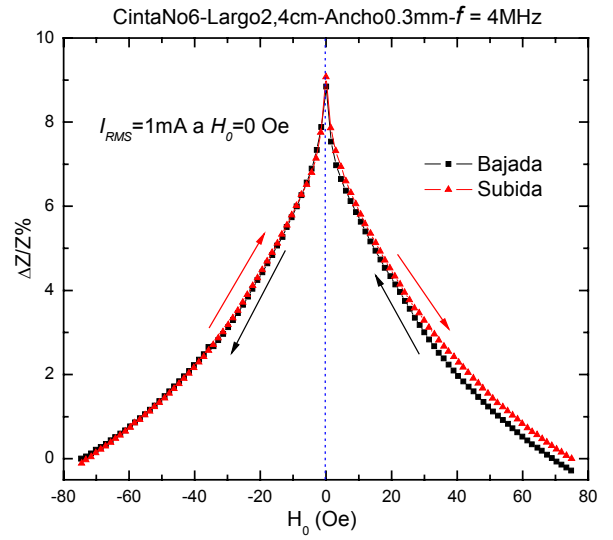


(d)

Figura 4.18 Efecto de histéresis en el comportamiento de MIG a $f = 4\text{ MHz}$.



(e)



(f)

Figura 4.18 Efecto de histéresis en el comportamiento de MIG en (a) *cinta 1*, (b) *cinta 2*, (c) *cinta 3*, (d) *cinta 4*, (e) *cinta 5*, y (f) *cinta 6*, a $f = 4$ MHz.

En la figura 4.18 se observa como la sustitución del Fe por el Cr en las cintas, induce una muy pequeña histéresis en el comportamiento de la MIG en algunas de las cintas, como se puede ver por ejemplo en el caso de la *cinta 3* y *cinta 5* a campo H_0 bajos, y en la *cinta 6* a campo H_0 altos.

4.2.2 Dependencia de la MIG con el ancho y longitud de la cinta

Para estudiar la influencia del ancho de la cinta con el comportamiento de MIG, se tomaron 2 tramos de *cinta 1* con 3 cms de longitud pero con anchos diferentes de 0.8 mm y 0.3 mm. En la figura 4.19 se observa la gran dependencia que tiene el efecto de MIG con el ancho de la cinta. Visiblemente hay una gran diferencia en parámetros como la razón de cambio, el campo anisotrópico H_k y la frecuencia de relajación f_x . En la figura 4.20 se puede observar con mejor claridad, la gran dependencia que tiene el efecto de MIG con el ancho de la cinta y como altera su comportamiento.

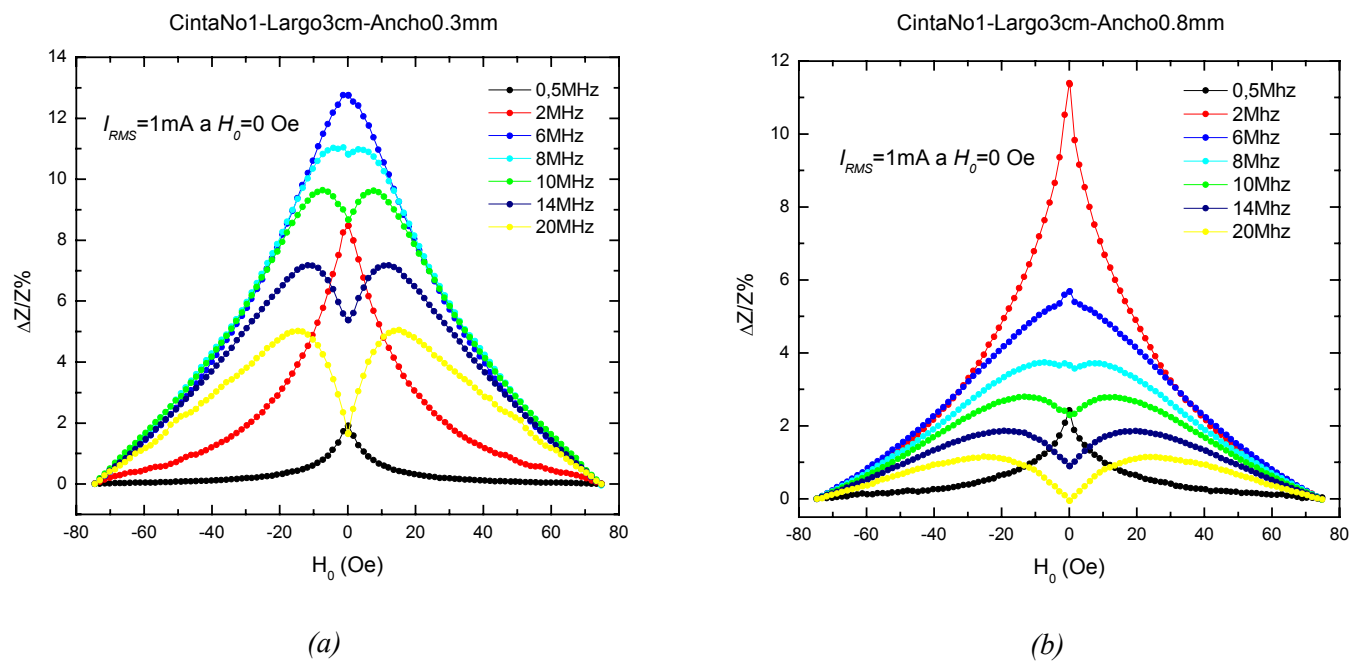


Figura 4.19 Razón de cambio de la MIG respecto al campo magnético para la **cinta 1** a diferentes ancho: (a) ancho 0.3mm y (b) 0.8mm a diferentes frecuencias.

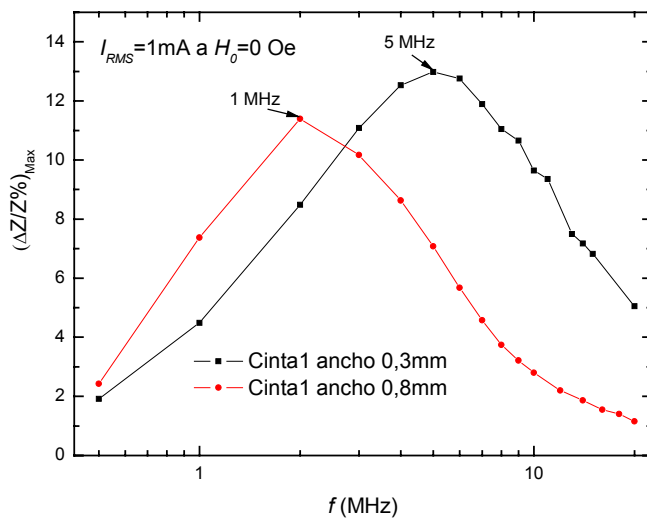


Figura 4.20 Espectro de la Razón de cambio de la MIG para la **cinta 1** con diferente ancho.

La dependencia de la MIG con el ancho de la cinta puede ser debida a que la densidad de corriente j_z que atraviesa una sección transversal de la cinta, no es igual para cada una de las cintas en las cintas debido a que el área de esta sección es diferente, aunque la corriente I_{RMS} aplicada a campo $H_0 = 0$ sobre las cintas sea la misma. Esto se encuentra de acuerdo con la dependencia que tiene la magnetoimpedancia con el valor de la corriente que se aplica a la muestra como se ilustra en la figura 4.21 [3].

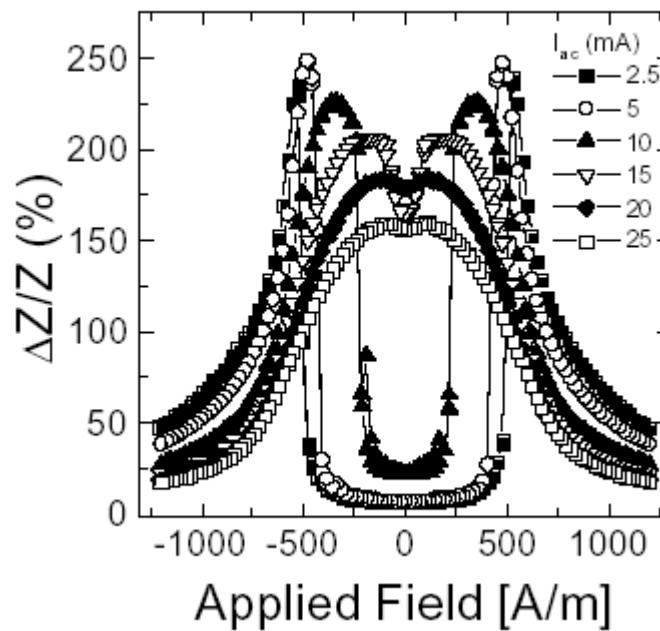


Figura 4.21 Razón de cambio de la MIG respecto a campo magnético para diferentes valores de corriente AC para un hilo a base de Co [3].

En el caso de la dependencia de la longitud de la cinta con el comportamiento de MIG, se tomaron 3 tramos de **cinta 6** de 0.7 mm ancho y con anchos longitudes diferentes de 3 cms, 6 cms y 9 cms. En la figura 4.22 se observa los comportamientos de la MIG a 4 MHz y a 8 MHz para cada uno de las cintas. Se puede ver como con el largo de la cinta solo se ve alterada la razón de cambio en la magnetoimpedancia. Los parámetros como campo anisotrópico H_k (± 4.7 Oe a 8 MHz) y la frecuencia de relajación f_x (3 MHz) son iguales en cada uno de los casos como se ilustra en la figura 4.23.

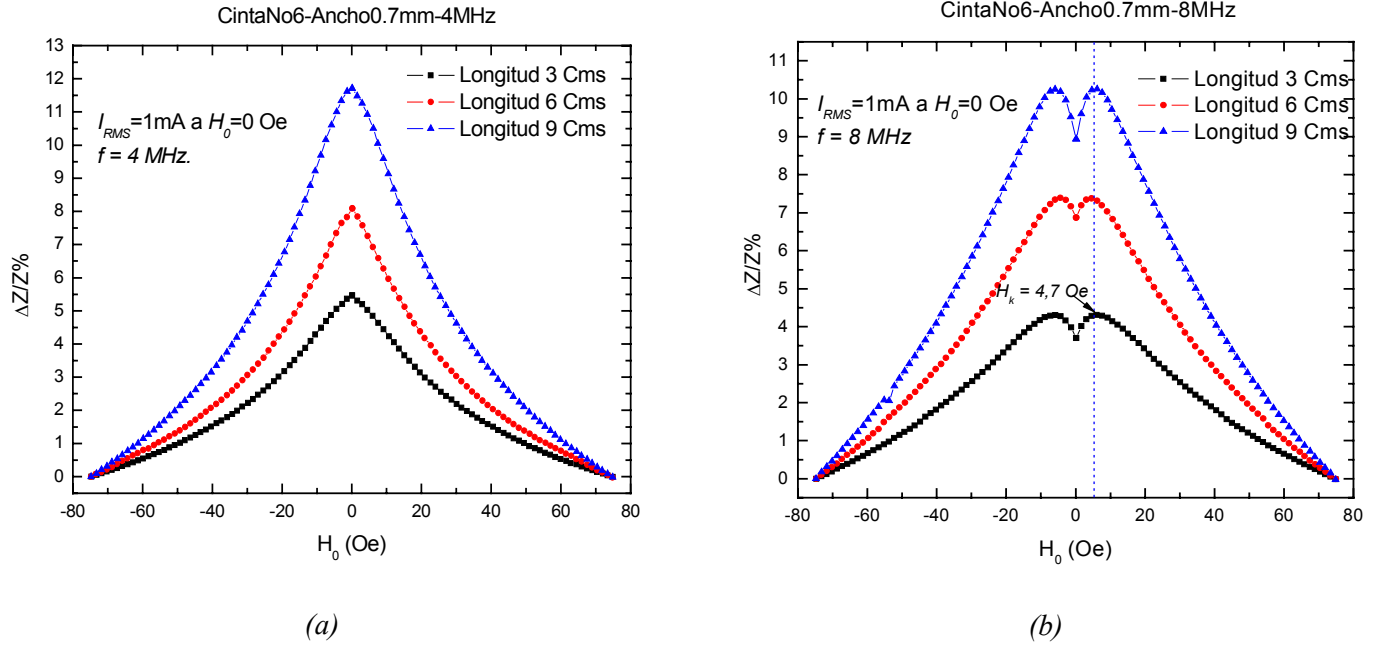


Figura 4.22 Razón de cambio de la MIG respecto al campo magnético para la **cinta 6** a diferentes longitudes: (a) $f = 4$ MHz y (b) 8 MHz

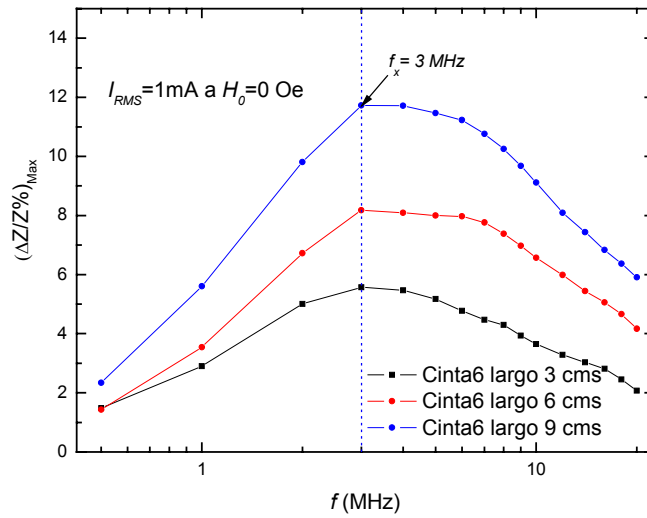


Figura 4.23 Razón de cambio de la MIG respecto a la frecuencia para la **cinta 6** con diferentes longitudes.

4.2.3 Dependencia de la magnetoimpedancia con la frecuencia

Como el efecto de magnetoimpedancia se genera por el efecto piel clásico modificado por el campo magnético H_0 aplicado, la dependencia de la frecuencia siempre refleja la información sobre la magnetización cumplida en el material. Es muy difícil obtener una descripción de la magnetoimpedancia en función de la permeabilidad de un material, debido a la característica tensorial de la permeabilidad efectiva. No obstante, unas relaciones aproximadas pueden presentar mucha información en algunas condiciones, por ejemplo, en caso de que el efecto piel sea grande $a / \delta_m \gg 1$, donde a es el espesor de la cinta y δ_m la profundidad de penetración, la magnetoimpedancia se puede expresar como $Z \propto (f\mu)^{1/2}$, donde μ es la permeabilidad transversal efectiva constituida por las contribuciones de los desplazamientos de las paredes de dominios y la de la rotación de magnetización (ver sección 1.3).

Con el fin de observar la dependencia de la magnetoimpedancia con la frecuencia, se construyo un gráfico en 3D que relaciona la impedancia $Z(\Omega)$ con el campo magnético H_0 y la frecuencia f para la **cinta 2**. Este gráfico se muestra en la figura 4.24. En la figura 4.25 se ilustra la proyección del plano $Z(\Omega)$ vs f para un valor de campo $H_0 = 75$ Oe.

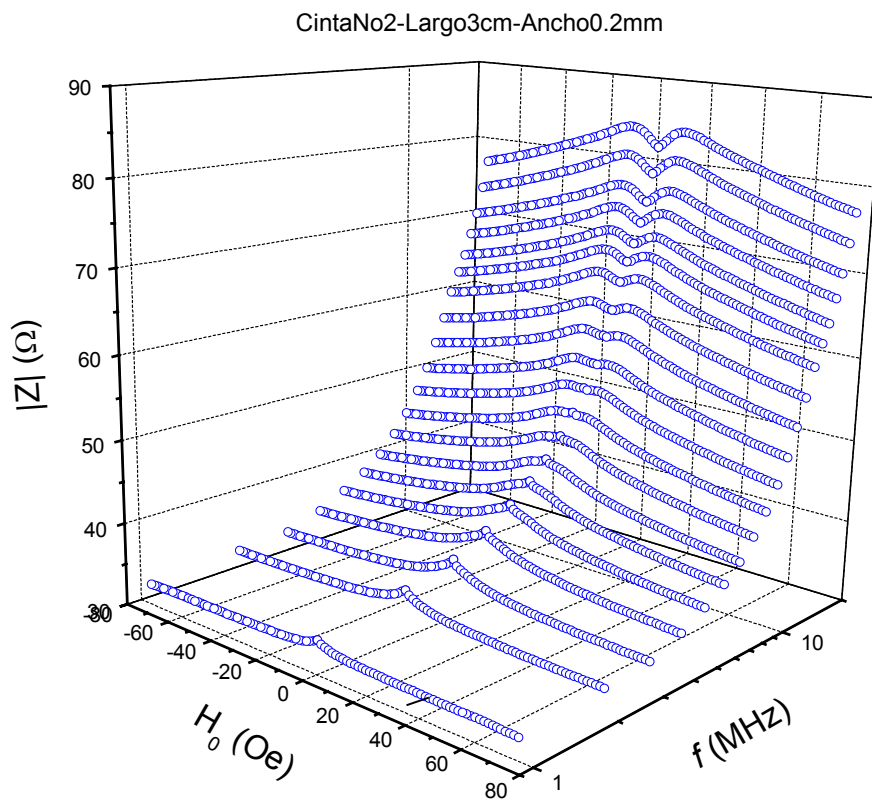


Figura 4.24 Gráfico en 3D que ilustra la dependencia de la impedancia Z con la frecuencia para la *cinta 2*.

En busca de una posible aplicación tecnológica, factores como la máxima razón de cambio en la impedancia, sensibilidad $((\Delta Z / Z\%) / Oe_{Max})$ y baja histéresis se deben de tener en cuenta para seleccionar cual es la mejor composición para determinada aplicación. Si nos fijamos en los datos de la tabla 4.2 y en la figura 4.18, las composiciones más óptimas para una posible aplicación son la *cinta 2* y la *cinta 4*. En la sección 5 se propone como aplicación tecnológica basada en el efecto de magnetoimpedancia gigante, un sensor de posición que utiliza la *cinta 2* como elemento de detección (elemento MIG).

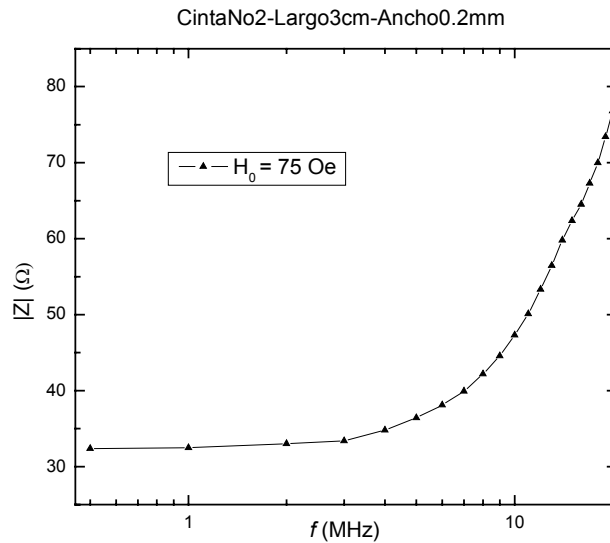


Figura 4.25 Curva que ilustra la dependencia de la impedancia Z con la frecuencia realizada para la cinta 2.

Referencias

- [1] Y. Makino. *Physics and Engineering Applications of Magnetism*. Edición Y. Ishikawa, N. Miura, vol 92, Tokio Japon (1991).
- [2] K.R. Pirota, M.L. Sartorelli, L. M. Knobel, J. Gutierrez, J.M. Barandiaran. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. vol. **202** (1999), p. 441 - 444.
- [3] M. Knobel, M. Vásquez and L. Kraus. *Giant Magnetoimpedance*. Versión 5 18th June 2002.
- [4] M. L. Sánchez, V. M. Prida, B. Hernando, M. Tejedor and M. Vázquez. *Recent Res. Devl. Non-Crystalline Solids*, vol **1** (2001), p. 191 - 201.
- [5] J.A. Moya, B. Arcondo, H. Sirkin, M.L. Sartorelli, M. Knobel, M. Vazquez. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. vol. **203** (1999), p. 117 - 119.
- [6] M. Knobel, K.R. Pirota. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. vol. **242** (2002), p. 33-40.
- [7] K. R. Pirota, L. Kraus, M. Knobel, P. G. Pagliuso, and C. Rettori. *Physical Review B*, vol **60** No. 9 (1999), p. 6685 – 6691.

5. APLICACIÓN TECNOLÓGICA DE LA MIG: SENSOR DE POSICIÓN

En este capítulo se presenta un prototipo de un sensor de campo magnético basado en el fenómeno de magnetoimpedancia gigante, adaptado para detectar la posición ó el movimiento de una pieza según la aplicación. También se enumeran los conceptos tenidos en cuenta para calibrar el sensor y optimizar su desempeño, así como las posibles aplicaciones en la industria del dispositivo presentado.

5.1 DETALLES EXPERIMENTALES

Basados en los resultados obtenidos en este trabajo, se utilizó para el desarrollo del sensor, una cinta amorfa de composición $Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ de 5 cm de largo por 0.2 mm de ancho como elemento MIG. Dada su alta fragilidad a la rotura y por protección, la cinta se introdujo cuidadosamente en un cilindro plástico de 4.5 cm de largo por 0.8 mm de diámetro, extraído de un cable de cobre comercial. Los contactos se realizaron con tinta de plata, limpiados antes con solución de ácido sulfúrico al 10%. Para obtener la respuesta de MIG y de la variación del voltaje AC respecto al campo magnético DC externo en el sensor, se utilizó el sistema *SMIG* desarrollado y descrito en la sección 2 de este trabajo, mientras para realizar las diferentes pruebas en el sensor, se usó la configuración mostrada en la figura 5.1. Para generar la corriente AC a lo largo de la cinta (aproximadamente entre 10 y 20 mA rms dependiendo de la impedancia del elemento MIG), se usó un generador de señales Agilent 33120A. Las medidas de voltaje en la muestra se hicieron por medio del

osciloscopio Fluke 192, el campo magnético aplicado en la cinta, se generó utilizando un imán permanente de NdFeB en forma de disco de 5 mm de diámetro por 2 mm de ancho y con un campo de 200 Oe a $d = 0$ cms, y para medir la distancia se utilizó una regla métrica plástica convencional.

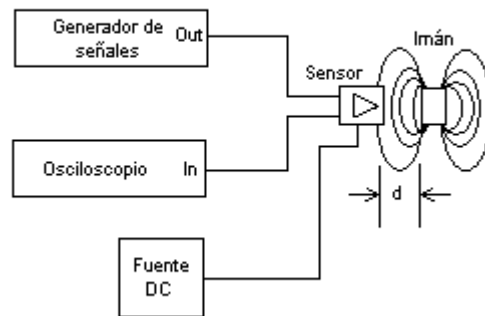


Figura 5.1 Diagrama del sistema de medida desarrollado para hacer las pruebas al sensor de posición.

En la figura 5.2 se ilustra el diagrama electrónico del sensor de posición implementado basado en el efecto de MIG. Los amplificadores operacionales National Instruments CLC428 [1] utilizados, se configuraron en modo de retroalimentación no inversora de voltaje y un factor de amplificación de 1, y se usan para el acople de impedancias con el generador de señales y el osciloscopio. La resistencia Vishay/Dale PTF56 [2] de $100\ \Omega$ a $1/8\ W$, no inductiva y con una tolerancia de precisión del 0.05 %, es utilizada para formar un circuito serie con la cinta (elemento MIG), y así poder medir las variaciones de voltaje en la cinta, producto del cambio de la impedancia en la cinta por efecto de un campo magnético DC externo.

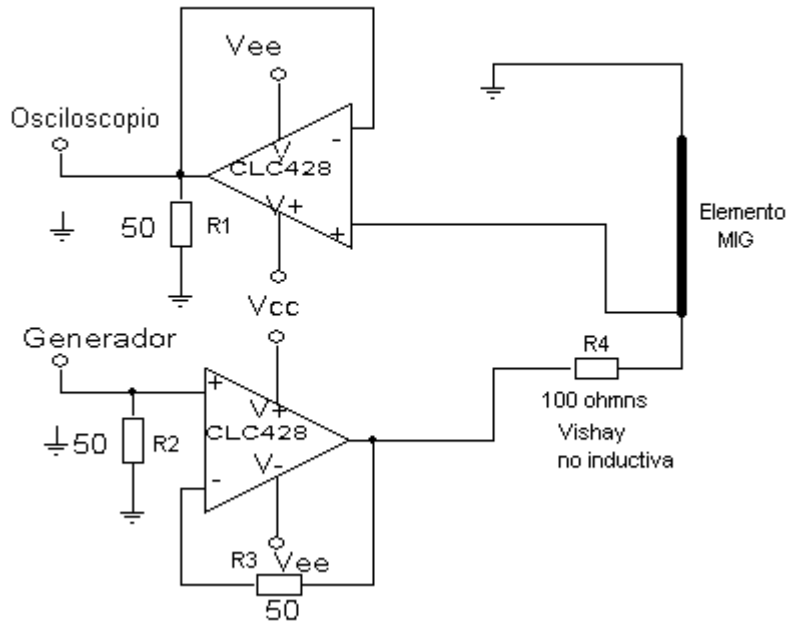


Figura 5.2 Diagrama electrónico del sensor de posición.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

Con el fin de determinar que frecuencia de la corriente aplicada al elemento MIG, es la óptima para obtener una máxima respuesta de MIG sin que esta presente el comportamiento de dos picos que conllevarían a obtener medidas erróneas en el sensor, se realizó un barrido a diversas frecuencias sobre la cinta utilizada como elemento MIG, con las mismas dimensiones a la utilizada en el sensor e introducida en el cilindro plástico. El resultado de esta medición se ilustra en la figura 5.3, donde se muestra claramente que la frecuencia ideal de trabajo del sensor es de 7 MHz.

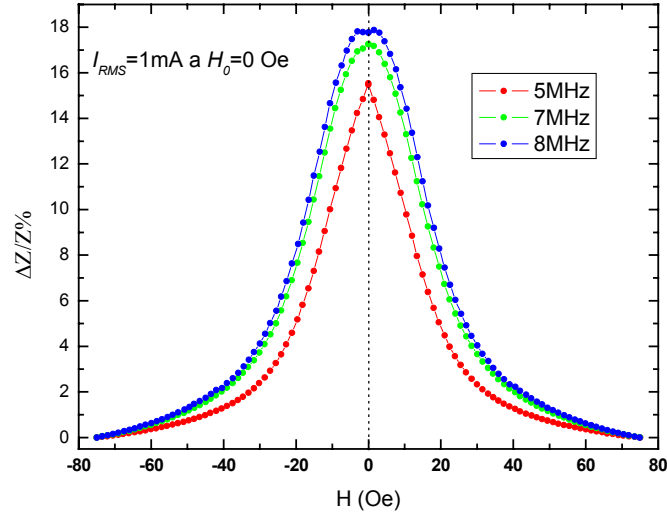


Figura 5.3 Comportamiento MIG en una cinta amorfa de $Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ de 5 cm de longitud por 0.2 mm de ancho a diversas frecuencias.

Una vez determinada la frecuencia ideal de trabajo para el sensor, se realizó un estudio detallado del efecto de MIG sobre el elemento MIG a esta frecuencia. En la figura 5.4, se muestra el comportamiento MIG de la cinta utilizada en el sensor a 7 MHz, donde se puede ver su excelente respuesta a los modos de medida normal y dual implementados en el sistema *SMIG* (ver apéndice A) y la ausencia de histéresis en la respuesta.

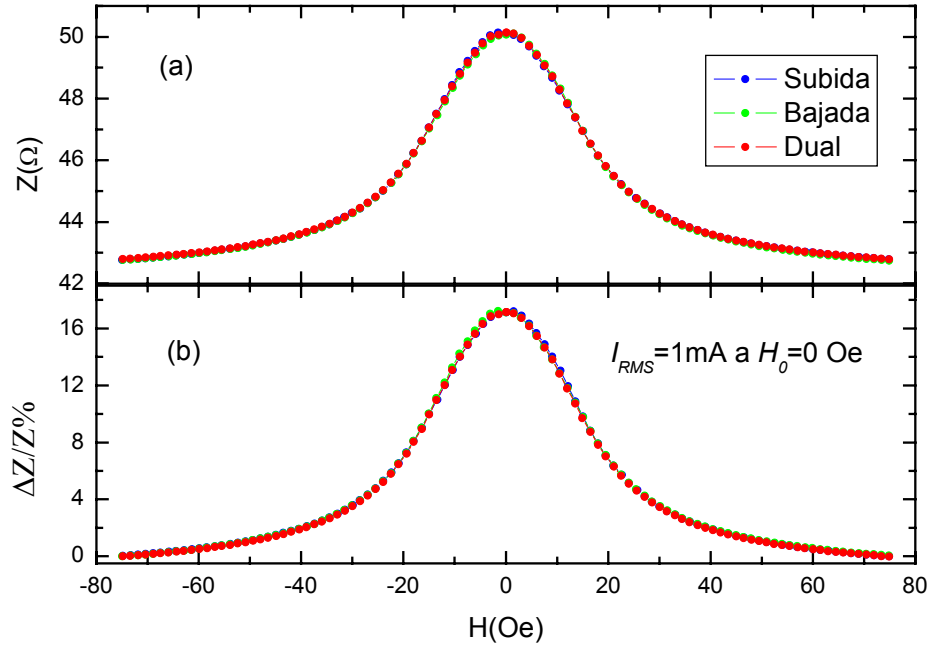


Figura 5.4 Comportamiento MIG en una cinta amorfa de $Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ de 5 cm de longitud por 0.2 mm de ancho a 7 MHz. (a) cambio de la impedancia en ohmios y (b) razón de cambio en la impedancia.

Con el fin de observar el cambio del voltaje AC en la cinta, por efecto del campo magnético externo, se realizaron unas pequeñas modificaciones al software *SMIG* para que este generara el grafico de voltaje en la muestra respecto al campo magnético. En la figura 5.5 se ilustra el comportamiento de V vs. H_0 de la cinta utilizada en el sensor de posición, la cual fue sometida a una corriente AC a campo $H_0 = 0$ Oe de 17 mA (2.5 V_{RMS} sobre el circuito serie).

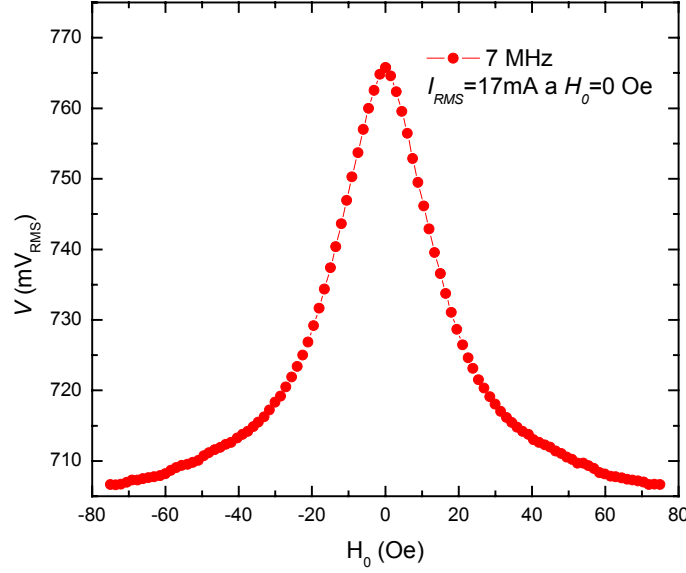


Figura 5.5 Comportamiento del voltaje en una cinta de $Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ de 5 cm de longitud por 0.2 mm en función del campo magnético externo a $f = 7$ MHz.

Para verificar la capacidad del dispositivo, el circuito serie formado por la resistencia y la cinta (elemento MIG) fue sometido a una corriente AC de 10 mA_{RMS} con una frecuencia de 7 MHz. Un pequeño imán permanente que genera un campo de 200 Oe fue posicionado cerca del sensor y el voltaje de respuesta V fue monitoreado como una función de la distancia entre el elemento MIG y el imán permanente, como se ilustra en la figura 5.6. En esta se puede observar que el voltaje V decrece desde 718 mV para una distancia de 4 cm hasta 650 mV para contacto físico. Para propósitos prácticos, por ejemplo en un proceso donde se desee detectar la presencia de un objeto, se puede considerar una distancia mínima de 1 cm entre el sensor y el imán para la detección, en la cual se tiene una respuesta de voltaje de 685 mV por parte del sensor. Así un decremento desde 718 mV a un valor $V \leq 650$ mV puede ser tomado como una detección. Por otro lado, si lo que se quiere es saber la

distancia a la que se encuentra un objeto, se puede trabajar en la parte que se puede considerar como lineal que va entre 0 cm y 2 cm (650 mV a 710 mV) aproximadamente.

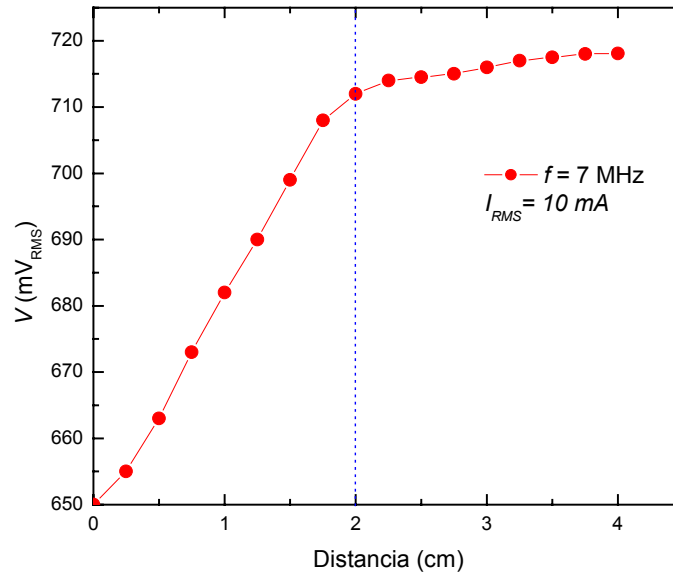


Figura 5.6 Dependencia del voltaje con la distancia entre el sensor y un imán permanente de NdFeB. El campo magnético del imán fue orientado paralelamente al eje longitudinal de la cinta.

Una posible aplicación práctica para este dispositivo se muestra en la figura 5.7. En cualquier proceso industrial que involucre la detección de movimiento de objetos (ensamble de partes en un proceso de fabricación, movimiento de vehículos en un parqueadero, etc.), es posible implementar un preciso control para la detección de objetos por medio de este dispositivo, simplemente sensando su respuesta de voltaje V . Dicha señal puede ser fácilmente rectificadora [3] a una señal DC, la cual puede ser llevada a un sistema de adquisición de datos, donde usando un simple programa de computación, el proceso puede ser monitoreado y controlado.

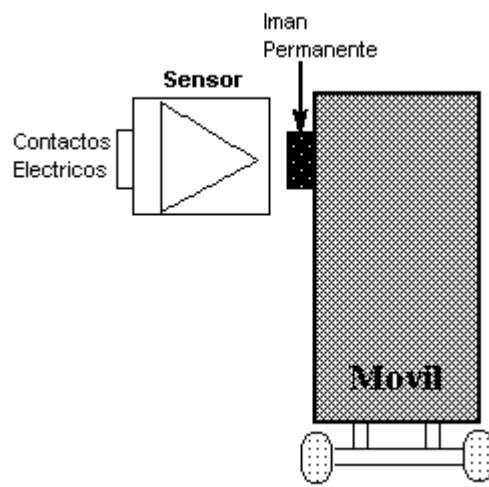


Figura 5.7 Esquema de una posible aplicación del sensor basado en MIG para la detección de un móvil.

Referencias

- [1] National Semiconductor Corporation. *National Analog and Interface Products Databook*. (1999).
- [2] Vishay Dale. Metal *Film Resistors, Precision, Ultra-High Stability*. Dirección de Internet:
<http://www.vishay.com/docs/31019/ptf.pdf>.
- [3] C. J. Savant, M. S. Roden and G. L. Carpenter. *Electronic Desing*. Addison- Wesley, Wilmington U.S.A. (1992)

6. CONCLUSIONES

- Se desarrolló un sistema versátil, económico, preciso y confiable, con su respectivo software de control, para la medición del fenómeno de Magnetoimpedancia Gigante *SMIG* en materiales en forma de hilos, cintas, películas y multicapas, en el estado amorfo, nanocristalino y cristalino, que permite realizar mediciones de impedancia hasta 20 MHz.
- Para la medición de la Magnetoimpedancia se desarrolló un método que tiene como ventaja de que sólo se utilizan dos contactos eléctricos sobre la muestra a estudiar, disminuyendo así los efectos de capacitancia y resistencia de contacto en la muestra.
- El microhilo de composición $Co_{80}Fe_{4.5}Si_{10}B_{1.5}Nb_4$ exhibió un comportamiento de un solo pico en la respuesta del efecto de Magnetoimpedancia Gigante en un rango de frecuencias de 0.5 – 20 MHz. Este microhilo presenta una máxima razón de cambio en la impedancia ($\Delta Z/Z$) de ~50% a una frecuencia de 10 MHz, una alta histéresis y magnetoimpedancia asimétrica.
- La influencia de sustituir gradualmente el Fe por el Cr en la respuesta del efecto de Magnetoimpedancia sobre cintas amorfas de composición $Fe_{73.5-x}Cr_xNb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ con $x = 0, 2, 4, 6, 8$ y 10 en un rango de frecuencias de 0.5 - 20 MHz, fue estudiado. Las cintas presentaron un comportamiento de uno, dos picos y hasta de tres picos, efecto que hasta el momento no se había observado, y que se presentó con una notable mayor intensidad en la cinta de composición $Fe_{67.5}Cr_6Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$. La aparición de más de

un pico en la respuesta de la MIG, manifiesta la presencia de una anisotropía transversal en las cintas.

- El efecto de histéresis en el comportamiento del efecto MIG, así como la dependencia del ancho y longitud de las cintas en su respuesta en el efecto de Magnetoimpedancia Gigante, fue analizado. Se observó la influencia que tiene el valor de la amplitud de corriente I_{ac} con este fenómeno, así como la dependencia que presenta la impedancia con la frecuencia cuando se presenta un alto efecto piel. Por otro lado, se determinó la frecuencia de relajación f_x en las respuestas del efecto de MIG en cada una de las cintas, frecuencia que establece los rangos de frecuencia en se presentan los comportamientos de uno, dos ó tres picos, y separa en dos regiones la influencia que tiene los movimientos en las paredes de dominios y la rotación de la magnetización en el proceso de magnetización, y en la Magnetoimpedancia.
- El efecto de Magnetoimpedancia Gigante depende de varios parámetros como la composición, forma, longitud y ancho de la muestra, de la frecuencia y la amplitud de corriente AC, forma de las estructuras de dominios etc., lo que hace muy complicado e interesante su preciso estudio e interpretación.
- Basándose en los resultados obtenidos del estudio realizado del fenómeno de MIG en las cintas fabricadas, se presentó el prototipo de un sensor de posición como aplicación tecnológica del efecto de magnetoimpedancia gigante, utilizando como elemento de detección la cinta de composición $Fe_{63.5}Cr_{10}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$, dada su buena respuesta del efecto de MIG. Por medio de este dispositivo, de una forma simple y económica, es posible desarrollar un preciso control para la detección de objetos en cualquier proceso industrial que involucre la detección de movimiento de objetos, como por ejemplo en el ensamble de partes en un proceso de fabricación, control de la posición de un pistón, para el control automático del registro de automóviles en un parqueadero etc.

7. PERSPECTIVAS

La realización de esta tesis de maestría fortalece la infraestructura investigativa del Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados de la sede y por ende de la Universidad Nacional de Colombia. Como consecuencia de la elaboración de este trabajo y de los resultados obtenidos, se abren nuevas expectativas en cuanto a la elaboración de otras tesis de grado ó trabajos de investigación en esta interesante área. A continuación se presentan algunas perspectivas referentes a este trabajo:

- Realizar estudios de efecto Hall y Magnetización sobre la familia de cintas fabricadas en este trabajo, con el fin de correlacionar dichos efectos con el de Magnetoimpedancia Gigante. Estudiar el comportamiento de MIG en otros tipos de compuestos.
- Hacer tratamientos térmicos en las cintas estudiadas, con el fin de cambiar algunas de sus propiedades magnéticas como la permeabilidad magnética y el coeficiente de magnetostricción, y observar como estos cambios alteran la respuesta de Magnetoimpedancia en estas cintas.
- Realizar las modificaciones necesarias con fin mejorar el desempeño del sistema *SMIG* (ver sección 2.1.4), de tal modo que le permita realizar estudios de Magnetoimpedancia Gigante MIG controlando la corriente I_{ac} durante todo el proceso de medición, ampliar el ancho de banda de operación del mismo, y poder utilizar éste sistema para realizar estudios de impedancia en otras áreas, como en sistemas biológicos o Bioimpedancia.

- Acondicionar el sistema de medición del efecto de MIG con los dispositivos necesarios, con el fin de realizar estudios de Magnetoimpedancia Gigante a diversos valores de temperatura y hacer estudios de Estrés- Impedancia.

APÉNDICE A.

MANUAL DE USUARIO DEL SOFTWARE “SMIG”.

A.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Para utilizar el software en el PC, éste deberá tener los siguientes requerimientos mínimos:

- Un PC compatible IBM[®] con un procesador Pentium[®] II 233Mhz.
- Windows 98/Millennium/2000/XP.
- Como mínimo, 64 MB en memoria RAM.

A.2 MANEJO DEL SOFTWARE

Para cargar el programa, ejecute SMIG.EXE (*Software de manejo del sistema para la medición del efecto de Magnetoimpedancia Gigante*), y a continuación le aparecerá el cuadro de diálogo principal, que se ilustra en la Fig. A1. Esta ventana presenta una serie de opciones y botones que dan acceso a las diferentes funciones del programa, como lo son la de tipo de Lock-In a utilizar (SR530 ó SR830) y tipo de medición a realizar variando campo o frecuencia. Al oprimir el botón *Aceptar* se desplegará una ventana dependiendo de la opción seleccionada.



Figura A1. Ventana principal del programa SMIG.

A.2.1 Cuadro de Dialogo: Variando Campo

Esta ventana (Figura A2) es la interfaz para realizar las mediciones de Magnetoimpedancia en función del campo magnético. En este cuadro se ilustran la graficas de impedancia Z vs H_0 y sus dos componentes real R_z vs H_0 e imaginaria X_z vs H_0 , una tabla donde se visualizan los datos obtenidos durante el proceso (resistencia, reactancia, impedancia y campo), botones de *Comenzar*, *Parar* y *Salir*. En este panel se da acceso a los siguientes parámetros de configuración:

- *Frecuencia de Trabajo*: es la frecuencia de la corriente aplicada a la muestra. Su valor esta entre 25 KHz y 20 MHz. Para habilitar este valor de frecuencia, se debe

dar clic sobre el botón *Agregar*, con el que se ira formando una lista de frecuencias en las cuales se realizaras las respectivas mediciones (Figura A.3).

- *Voltaje aplicado*: indica el valor de voltaje en mV_{RMS} aplicado al circuito serie formado por la resistencia y la muestra. El máximo valor admitido es de 1 V_{RMS} .
- *Paso de corriente*: representa el incremento en amperios de la corriente aplicado a la bobinas de Helmholtz para generar el campo magnético aplicado a la muestra.
- *Resistencia en serie*: indica el valor de la resistencia en serie con la muestra.
- *Mediciones por punto*: con este parámetro se le dice al sistema cuantas mediciones por punto son realizadas, antes de ser promediadas y visualizadas.

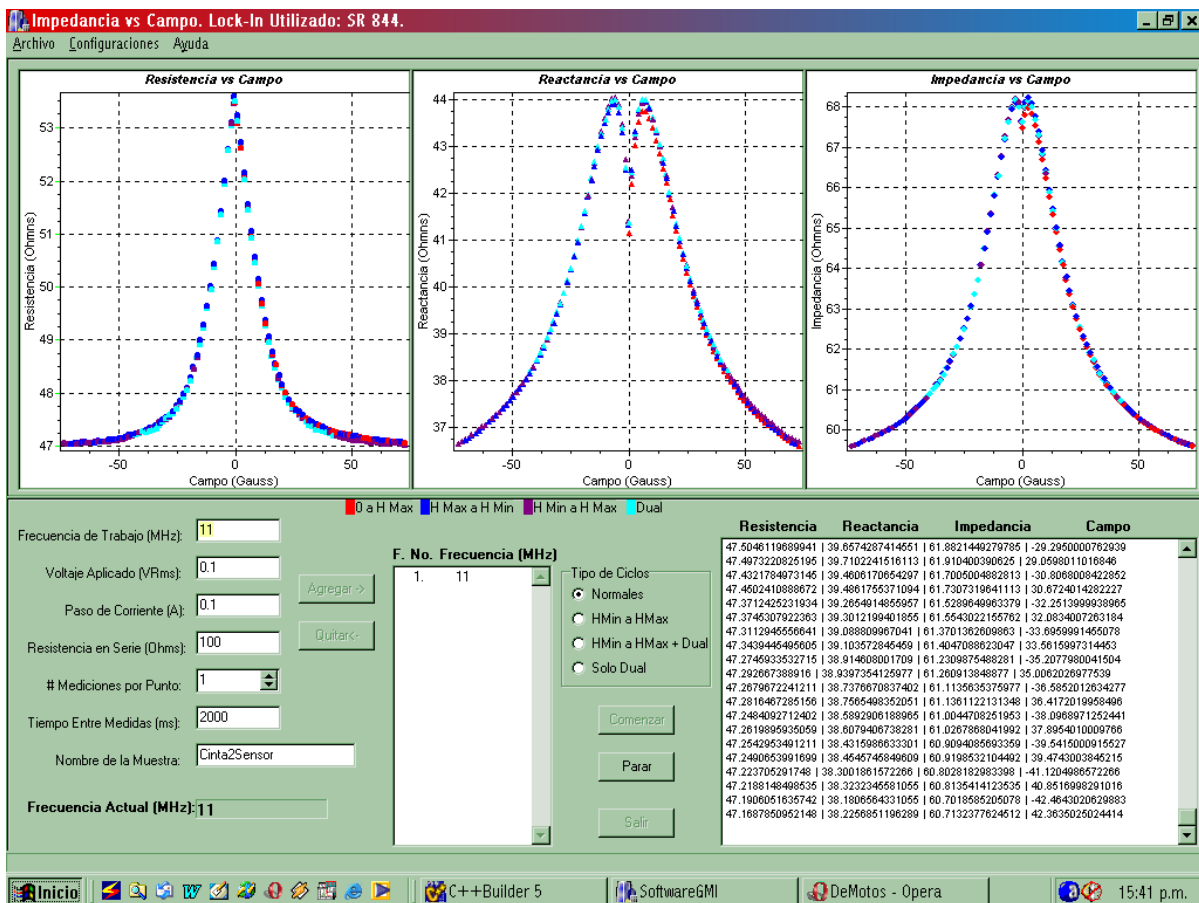


Figura A2. Ventana de Impedancia vs Campo del programa SMIG.

- *Tiempo entre medidas:* indica el tiempo en milisegundos que el sistema espera después de modificar el campo magnético para hacer una medición, con el fin de que la muestra se estabilice.



F. No.	Frecuencia (MHz)
1.	1
2.	2
3.	5
4.	10
5.	17
6.	20

Figura A3. Lista de frecuencias formada para realizar las respectivas mediciones.

- *Nombre de la muestra:* en este campo se escribe el nombre del archivo donde serán guardados los datos, para su posterior análisis. Los datos son guardados después de cada medición.

En la parte superior de las ventanas de *Impedancia vs Campo* se encuentran varios menús como lo son *Archivo* donde se puede comenzar, parar una medición y salir de esta ventana. En *configuraciones* se configuran los diferentes parámetros referentes a la comunicación serial del Lock-In y el generador de señales con el PC.

El software permite a su vez realizar diferentes tipos de ciclos de medición, que no es mas de como aplicado el campo magnético en la muestra. En la figura A4 se ilustra el cuadro de selección. Por ejemplo seleccionando *Normales*, se realizarán todos los ciclos de medición

permitidos por el sistema, de 0 a $H_{m\acute{a}x}$, de $H_{m\acute{a}x}$ a $H_{m\acute{i}n}$, $H_{m\acute{i}n}$ a $H_{m\acute{a}x}$ y por ultimo el *dual*. Dual se refiere a que las mediciones se haran por saltos, esto quiere decir, para el caso en que el incremento sea de 1 Gauss (paso 0.1 mA aproximadamente) la medición se hara: 0, -1, 1, -2, 2, -3, 3, -4, 4, ..., $H_{m\acute{i}n}$, $H_{m\acute{a}x}$.

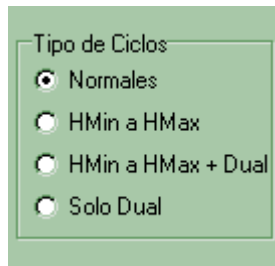


Figura A4. Cuadro de diálogo de selección de tipo de medición.

A.2.2 Cuadro de Dialogo: Variando Frecuencia

En la figura A5 se ilustra la ventana variando frecuencia, es la interfaz para realizar las mediciones de Magnetoimpedancia en función de la frecuencia. En esta interfaz se ilustran la graficas de impedancia Z vs F y sus componentes real R_z vs F e imaginaria X_z vs F , un memo donde se visualizan los datos obtenidos durante el proceso (resistencia, reactancia, impedancia y frecuencia), botones de *Comenzar*, *Parar* y *Salir*. En este panel se da acceso a los siguientes parámetros de configuración:

- *Campo*: es el valor del campo magnético aplicada a la muestra durante un barrido de frecuencia. Su valor esta entre -80 Gauss y 80 Gauss. Para habilitar este valor de campo, se debe dar clic sobre el botón *Agregar*, con el que se ira formando una lista de campos en las cuales se realizaras las respectivas mediciones (Figura A.6).
- *Frecuencia inicial y final*: en estos campos, se pone el rango de frecuencias en el que se va ha realizar la medida.
- *Paso de frecuencia*: representa el incremento en MHz de la frecuencia.

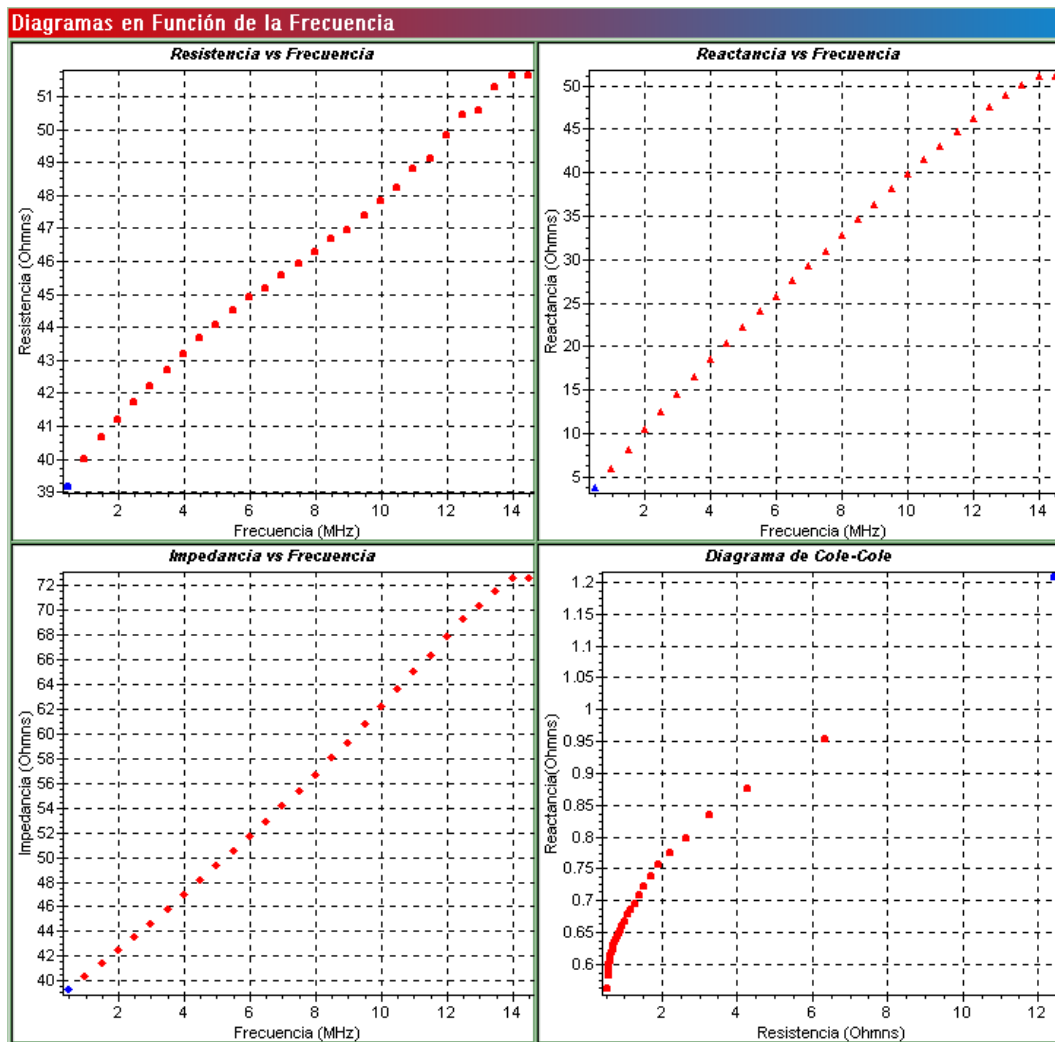
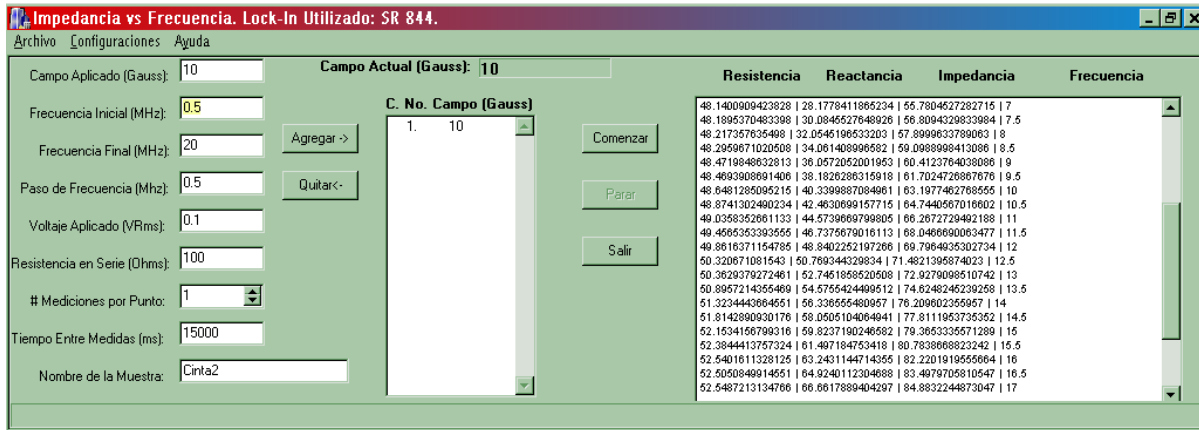


Figura A5. Ventana de Impedancia vs Frecuencia del programa SMIG.

- *Resistencia en serie*: indica el valor de la resistencia en serie con la muestra.
- *Mediciones por punto*: con este parámetro se le dice al sistema cuantas mediciones por punto son realizadas, antes de ser promediadas y visualizadas.
- *Tiempo entre medidas*: indica el tiempo en milisegundos que el sistema espera después de modificar el campo magnético para hacer una medición, con el fin de que la muestra se estabilice.
- *Nombre de la muestra*: en este campo se escribe el nombre del archivo donde serán guardados los datos, para su posterior análisis. Los datos son guardados después de cada medición.

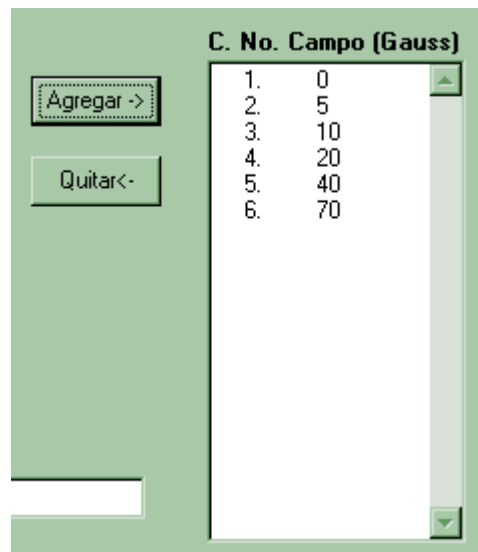


Figura A6. Lista de campo magnético formada para realizar las respectivas mediciones.

APÉNDICE B: ARTICULOS, TRABAJOS Y RECONOCIMIENTOS OBTENIDOS RELACIONADOS CON ESTE TRABAJO.

En el siguiente apartado se muestran algunos de los trabajos realizados en el marco de las actividades científicas del grupo de Magnetismo y Materiales Avanzados de Manizales en los cuales he participado activamente y que sin duda han construido los cimientos para la elaboración de esta tesis. Algunos de estos trabajos han sido presentados en la modalidad de mural en congresos nacionales de física y en conferencias internacionales como International Conference On Magnetism ICM2003 (Roma-Italia) y en la III Conferencia Internacional de Ingeniería Física 2004 (México D.F.). Por último se anexa una copia del certificado expedido por la Sociedad Colombiana de Física en donde se premia el trabajo “*Structural and Magnetic Properties, and Magnetic Domain structure in Ultrasoft FeCrNbCuSiB Magnetic Alloys*” como mejor mural del XX Congreso Nacional de Física, realizado en Armenia en septiembre del 2003.

PROPIEDADES ESTRUCTURALES, MAGNÉTICAS, Y ESTRUCTURA DE DOMINIOS EN CINTAS MAGNÉTICAS ULTRABLANDAS DE FeCrNbCuSiB

Andrés Rosales Rivera⁽¹⁾, Víctor Valencia, Mónica Gómez

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados
Manizales, Caldas, Colombia, A.A. 127

⁽¹⁾ Autor para correspondencia: arosales@epm.net.co ; Tel. fax: 57-68741367

RESUMEN

Se presenta un estudio de las propiedades estructurales y magnéticas de aleaciones en forma de cintas del material $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Cr}_x\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ con $x=0$ y 10, después de que las cintas fueron procesadas apropiadamente presentando una estructura nanocristalina y mostrando comportamiento magnético ultrablando, en particular el efecto de magneto-impedancia gigante, GMI [1]. Las muestras fueron caracterizadas a través de difracción de rayos X, XRD, magnetometría de muestra vibrante, VSM, mediciones de GMI y microscopía de fuerza atómica y magnética, AFM/MFM. Se estudia con particular atención la estructura de dominio a través de imagen MFM; estos estudios muestran una estructura de dominio periódica tipo franja. Se presenta una comparación entre las propiedades estructurales y magnéticas, y la estructura de dominios de los anteriores compuestos; esas propiedades se analizan en conexión con el efecto GMI.

ABSTRACT

The structural and magnetic properties of $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Cr}_x\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy ribbons with $x=0$ and 10, have been studied after appropriate processing achieving nanocrystalline structure and showing ultrasoft magnetic behavior, especially giant magnetoimpedance effect, GMI [1]. Characterization has been performed by X-ray diffraction (XRD), vibrating sample magnetometry (VSM), GMI measurements and atomic force microscopy/magnetic force microscopy (AFM/MFM). Particular attention has been paid to observation of domain structure by MFM imaging. A periodic stripe domain structure is generally observed. A comparison between structural and magnetic properties and magnetic domain structures of above compounds is presented, and such properties are analyzed in connection with the GMI effect.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Acerca del efecto de magneto-impedancia gigante

El efecto de magneto-impedancia gigante, GMI, observado en materiales ferromagnéticos blandos, consiste en una gran variación de la impedancia alterna ac, $Z = R + iX$ (donde R es la resistencia o parte real y X es la reactancia o parte imaginaria), cuando a través de una muestra del material se hace pasar una corriente eléctrica ac de magnitud (I_{ac}) y frecuencia (f) en presencia de un campo magnético dc, H . Usualmente, la razón de cambio en la magneto-impedancia gigante, es definida de la siguiente manera [2]:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{[Z(H) - Z(H_{max})]}{Z(H_{max})} \times 100 \quad (1)$$

donde $|Z|$ es el módulo de la impedancia, $|Z|^2 = R^2 + X^2$, y H_{max} es el campo en el que el material se considera magnéticamente saturado. Se han reportado cambios de hasta 600% a frecuencias alrededor de 1 MHz para campos máximos del orden de 100 Oe; además, sensibilidades de campo máximo hasta de 500% /Oe se han logrado en la región de campo bajo (típicamente menores que 5 Oe). Esto lleva a que los materiales que presentan GMI sean apropiados para aplicaciones en sensores. Diferentes aspectos asociados con el fenómeno GMI, tales como su dependencia con el campo y la frecuencia, han sido estudiados exhaustivamente [2-4], además su aplicación tecnológica también ha sido intensamente investigada [5]; sin embargo, existen pocos estudios sobre las propiedades estructurales, magnéticas y la estructura de dominios de los materiales que exhiben el fenómeno GMI y su relación de esas propiedades con el mismo. El objetivo del presente trabajo, es presentar, adicionalmente, al estudio de la dependencia con la frecuencia de GMI, una comparación entre las propiedades estructurales, magnéticas, y la estructura de dominios de las aleaciones en forma de cintas del material

ferromagnético $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Cr}_x\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ con $x = 0$ y 10.

1.2 Magneto-impedancia gigante y el efecto piel

Además del campo magnético dc aplicado, el parámetro importante en la determinación de GMI es la frecuencia f de la corriente eléctrica alterna I_{ac} , aplicada a la muestra. Dependiendo de la frecuencia, se pueden distinguir tres regiones: (1) región de frecuencias muy bajas (1-10 kHz), en la cual, el cambio de la impedancia está adscrito exclusivamente al efecto magneto-inductivo que proviene del proceso de magnetización circular; (2) región de frecuencias bajas (10-100 kHz) e intermedias (100 kHz-20 MHz); en ambos casos, el cambio en la impedancia se asocia al efecto piel a través de la variación de la profundidad de penetración magnética debido al cambio en la permeabilidad causado por el campo magnético dc. Para la región de frecuencias bajas, tanto las paredes de los dominios y la rotación de la magnetización contribuyen al cambio en la permeabilidad circular y consecuentemente al efecto piel, mientras que para la región de frecuencias intermedias, las paredes de los dominios son fuertemente “amortiguadas” y sólo la rotación de la magnetización contribuye al efecto piel y por ende al fenómeno GMI; y (3) región de frecuencias altas (típicamente superiores a 20 MHz), en la que las paredes son completamente amortiguadas, la rotación de la magnetización es influenciada por el efecto giromagnético y la permeabilidad decrece fuertemente hasta que el fenómeno de resonancia es alcanzado. En las dos primeras regiones, Z , se puede determinar a través de la técnica denominada “*cuatro puntas*” en la que una caída de voltaje se puede medir en los extremos del material mientras se mantiene constante la amplitud de la corriente ac de frecuencia f que se le aplica. El campo circular ac, H_{ac} , generado por la corriente lleva a cambios en la componente circular de la magnetización, M_{ac} , induciendo un voltaje, $V_{ind} = -N S \mu_r \omega \Delta H_{ac}$. El efecto piel consiste en que la corriente alterna a diferencia de la corriente continua no se distribuye uniformemente a través de un material conductor, y en general, se confina en una capa de profundidad, $\delta = [1/(\pi\sigma\mu f)]^{1/2}$, próxima a la superficie del conductor como una consecuencia de las corrientes de eddy que balancean la corriente en la parte interna. En la expresión para la profundidad de penetración δ , σ es la conductividad eléctrica del material, μ su permeabilidad circular escalar (o transversal) y f la frecuencia, además ella es válida sólo en el caso del denominado efecto piel normal, que se produce cuando δ es mucho mayor que el camino libre medio de los electrones, l . Para δ mucho menor que l , se presenta el efecto piel anormal (ver

Ref.[6]). Un aspecto importante del efecto GMI observado en conductores ferromagnéticos blandos es el hecho que el efecto piel se manifiesta en frecuencias que son varios ordenes de magnitud menores que aquéllas esperadas para un conductor no magnético con equivalente conductividad eléctrica, σ [2]. Además, para observar GMI el término $\sigma\mu(H,f)f$, debe ser suficientemente grande y significativamente modificado por el campo dc.

2. DETALLES EXPERIMENTALES

Las muestras fueron fabricadas usando el método de “melt-spin”. La estructura de las muestras fueron analizadas por medio de difracción de rayos X usando un difractómetro (D8 Advance Bruker), con una radiación $\text{CuK}\alpha 1$. Además, un SPM Autoprobe CP (Park Scientific Instruments) fue usado para investigar la estructura de dominios. La técnica de dos pasos fue usada en imagen MFM, ambas imágenes, la topográfica y la magnética fueron obtenidas simultáneamente. El espectro fue tomado a temperatura ambiente. Las características magnéticas, tales como, la magnetización de saturación M_s y coercitividad H_c , fueron estudiadas usando un magnetómetro de muestra vibrante para campos magnéticos comprendidos en el rango, $-10 < H < 10$ kOe, a temperatura ambiente. Las medidas de magneto-impedancia, fueron realizadas usando el método de las cuatro puntas, en temperatura ambiente para frecuencias de 0.1 a 20 MHz y campos magnéticos dc comprendidos en el rango, $-80 < H < 80$ Oe. El campo magnético dc fué aplicado paralelo a la corriente a lo largo de la dirección longitudinal de la muestra. La longitud de las muestras usadas fue de 5 cm.

3. ALGUNOS RESULTADOS

La Fig.1, muestra la dependencia con el campo del cambio en la resistencia, la reactancia y la impedancia total, en el rango de frecuencia $0.1 \leq f \leq 5$ MHz para la cinta del material $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$. Para $f < 3$ MHz, el cambio en la impedancia, $\Delta Z/Z$, presenta un pico en $H = 0$, lo que refleja el comportamiento denominado “*un pico*”. La amplitud de $\Delta Z/Z$ se incrementa y el pico se amplía con el incremento de la frecuencia, pero continúa razonablemente bien definido. El cambio de la impedancia es atribuido al efecto magneto-inductivo que surge del proceso de magnetización transversal [2]. Para frecuencias más altas, $3 < f < 5$ MHz, el pico de $\Delta Z/Z$ se divide en dos máximos simétricos: uno en $H_+ > 0$ y otro en $H_- < 0$, con $H_+ = H_-$, reflejando el comportamiento llamado “*dos máximos*”. La amplitud de $\Delta Z/Z$ decrece y la posición de los máximos, muestran una

ligera dependencia con la frecuencia. Estos resultados, están de acuerdo con otros previamente observados en cintas de materiales magnéticos blandos con estructura nanocristalina [7].

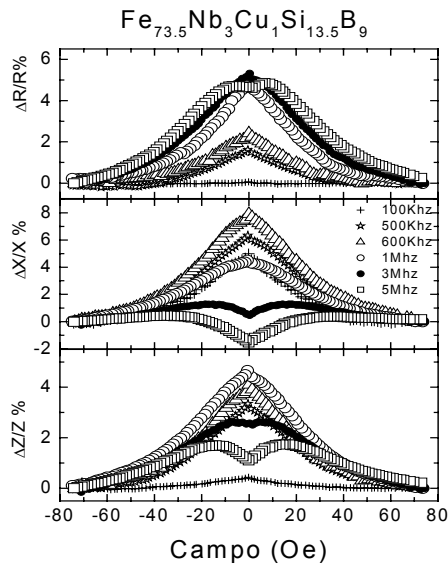


Fig.1. Cambios en la reactancia, $\Delta X/X$, la resistividad $\Delta R/R$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$, en cintas de $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ para diferentes frecuencias.

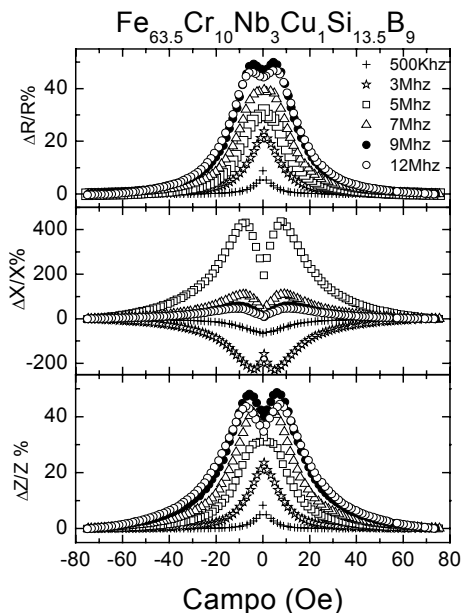


Figura 2. Cambios en la reactancia, $\Delta X/X$, la resistividad $\Delta R/R$, y en la impedancia total, $\Delta Z/Z$ en cintas de $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ para diferentes frecuencias.

La Fig.2, muestra la dependencia con el campo del cambio en la resistencia, la reactancia y la impedancia

total, en el rango de frecuencia $0.6 \leq f \leq 12$ MHz para la cinta del material $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$. El comportamiento de $\Delta Z/Z$, para las cintas de $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, mostrado en la Fig.2, es similar al comportamiento de $\Delta Z/Z$ observado en $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, pero el límite de frecuencia donde el comportamiento de un pico y el comportamiento de dos máximos son observados, es más alto en $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ que en $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

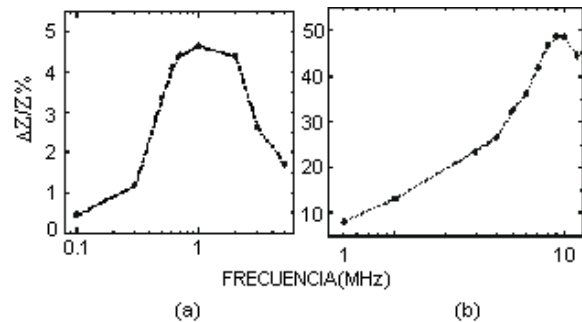


Fig.3. Dependencia con la frecuencia de $\Delta Z/Z$ para: (a) $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ y (b) $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

La Fig.3, ilustra el cambio $\Delta Z/Z$ como función de la frecuencia. Para la cinta $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, se observa que $\Delta Z/Z$ alcanza un valor máximo ($\sim 5\%$) en la frecuencia de 1 MHz y presenta comportamiento de un pico para $f < 2$ MHz, mientras que su comportamiento es de dos máximos para $f > 2$ MHz, como se puede notar en la Fig.3a. Para la cinta $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, $\Delta Z/Z$ alcanza su valor máximo ($\sim 40\%$) en la frecuencia de 9 MHz, su comportamiento de un solo pico se extiende hasta aproximadamente una frecuencia de 7 MHz, a partir de donde comienza el comportamiento de dos máximos, como se puede notar en la Fig.3b. El cambio de $\Delta Z/Z$ presenta un mayor valor en $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ que en $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

La Fig.4, muestra la curva de magnetización en función del campo magnético para cada una de las cintas, a partir de la cual se deduce una magnetización de saturación de 142 emu/g para $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (Fig.4a), y 30 emu/g para $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (Fig.4b); este resultado puede ser asociado con la presencia del Cr.

Las imágenes MFM ilustradas en la Fig.5, muestran una estructura de dominios magnéticos periódica tipo franja, razonablemente bien definida, pero la estructura de $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (Fig.5b) es mejor definida que la observada en $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (Fig.5a). Las imágenes topográficas AFM de la Fig.6, muestran una

estructura de granos razonablemente bien definida, pero la estructura de granos de $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (Fig.6a), es mejor definida que la observada en $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (Fig.6b). El tamaño de grano superficial para $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ es de $0.32\text{ }\mu\text{m}$ y para $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ es de $0.18\text{ }\mu\text{m}$. Las anteriores características podrían ser atribuidas a la presencia del Cr.

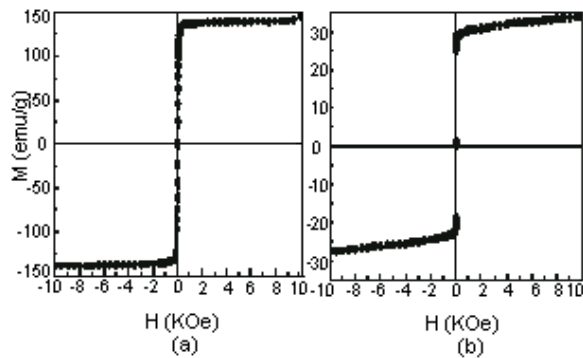


Figura 4. Curvas de M en función de H para:
(a) $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ y (b) $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

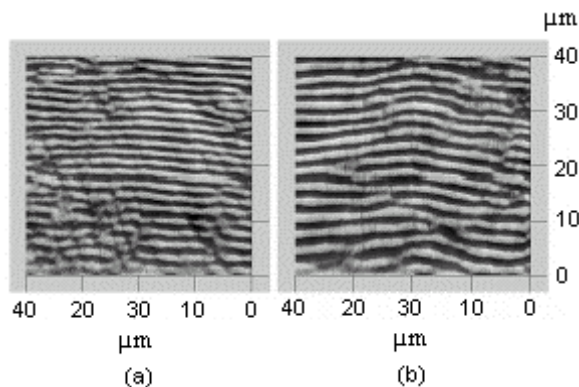


Fig.5. Estructura de dominios magnéticos, imagen MFM:
(a) $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$; (b) $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

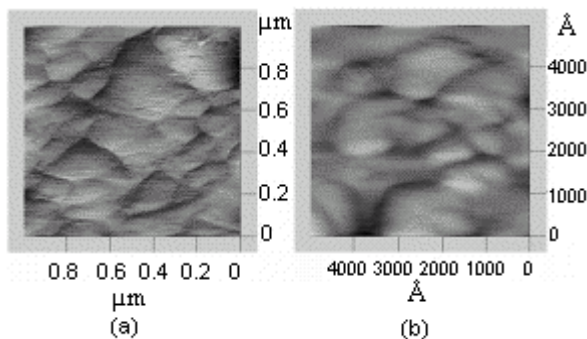


Figura 6. Imágenes topográficas AFM:
(a) $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ y (b) $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

El patrón de difracción XRD para $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (no mostrado aquí) exhibe un pico amplio, razonablemente bien definido, el cual se asemeja al estado nanocristalino, en concordancia con la estructura de grano obtenida por microscopia de fuerza atómica en la misma muestra.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

El hecho que el cambio de $\Delta Z/Z$ observado en la cinta de $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ sea mayor que el correspondiente en la cinta $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, puede ser atribuido a los siguientes factores: (1) diferencias en la resistividad eléctrica de estas cintas [8] y (2) diferencias en la estructura de dominios magnéticos, la cual es mejor definida en la cinta de $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$. Estos factores podrían ser asociados con la sustitución del Fe por el Cr, aunque no se puede descartar otras causas, tales como el ancho de las cintas y el espesor de las mismas. Es conocido [2] que esos parámetros influyen en el comportamiento del efecto GMI y en el presente estudio no se tuvo un total control sobre los mismos. La presencia del Cr podría aumentar tanto la conductividad eléctrica σ , como la permeabilidad μ , llevando con esto a una disminución de la profundidad de penetración δ ; sin embargo, disminuye la magnetización de saturación. En conclusión, se ha presentado una comparación entre las propiedades estructurales, magnéticas, y la estructura de dominios de $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Cr}_x\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ con $x = 0$ y 10 , y se ha intentado establecer una relación de esas propiedades con el fenómeno GMI manifestado en esas muestras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Profesor Manuel Vázquez del ICMN de Madrid, España, y al Doctor Marco Coisson del Instituto Electrónico Nazionale Galileo Ferraris, por proveer las muestras; a la Ingeniera Yulieth Cristina Arango y al M. Sc Diego Arias del Laboratorio de Física del Plasma de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, por su asistencia en los estudios de XRD y de AFM/MFM.

REFERENCIAS

1. Y-F. Li et al., IEEE Trans. Magnetics., vol. MAG-38, pp. 3096-3098, 2002.
2. M. Vázquez, J. Magn. Magn. Matter; 226-230 (2001) 693-699; M. Knobel, M. Vázquez, and L. Kraus, "Giant Magnetoimpedance" en prensa.
3. F.L.A. Machado, B. Lopes da Silva, E. Montarroyos, J. Appl. Phys. 73 (1993) 687.

4. K. Mandal, S.K. Ghatak, Phys. Rev. B 47 (1993) 14233.
5. V.E. Makhotkin, B.P. Shurukhin, V.A. Lopatin, P. Yu. Marchukov, Yu.K. Levin, sensors Actuators A 25-27 (1991) 759.
6. J. Ziman, Principios de la teoría del cuerpo sólido, cap. 8, §7, Editorial Mir, Moscú, 1974.
7. H. Chiriac and T.-A. Óvári, IEEE Trans. on Magnetics, vol. 38 No.5, 3057-3062 (2002).
8. M. Knobel, H. Chiriac, J.P. Sinhecker, S. Marinescu, T. A. Óvári, and A. Inohue, Sensors and actuators A: Physical 59 (1997), p. 256.

STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES, AND MAGNETIC DOMAIN STRUCTURE IN ULTRASOFT $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Cr}_x\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ MAGNETIC ALLOYS

Andrés Rosales¹, Víctor Hugo Valencia, Jorge A. Morales, Abilo Andrés Velásquez
Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

ABSTRACT

The structural and magnetic properties of $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Cr}_x\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy ribbons have been studied after appropriate processing achieving nanocrystalline structure and showing ultrasoft magnetic behavior, especially giant magnetoimpedance effect, GMI[1]. Characterization has been performed by X-ray diffraction (XRD), vibrating sample magnetometry (VSM), GMI measurements and atomic force microscopy/magnetic force microscopy (AFM/MFM). Particular attention has been paid to observation of domain structure by MFM imaging. A periodic stripe domain structure is generally observed. A comparison between structural and magnetic properties (i.e. coercivity, remanence) and magnetic domain structures of above compounds is presented, and such properties are analyzed in connection with the GMI effect.

INTRODUCTION

It is now twelve years since the giant magneto-impedance (GMI) effect was observed [2-4]; this effect consists of a large variation of the impedance, Z , both real and imaginary components of a soft magnetic conductor, when submitted to a relatively small dc magnetic field or a stress. Sensitivity of up 500%/Oe has been observed in the very low field region (less than 1 Oe) field region. In agreement to existing results, to observe GMI, the material has to have good soft magnetic properties (i.e. high permeability and low coercive force), and appropriate domain structure (typically, a transverse one for ribbons in plane, transverse to the ribbon axis and to the applied dc field as well), and a circumferential one for wires. The structural and magnetic properties of the alloy ribbons $\text{Fe}_{73.5-x}\text{Cr}_x\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ with $x = 0$ and 10 are studied here by X-ray diffraction (XRD), vibrating sample magnetometry, GMI measurements and atomic force microscopy/magnetic force microscopy (AFM/MFM). A comparison between structural and magnetic properties and magnetic domain structures of above compounds is presented, and such properties are analyzed in connection with GMI effect.

EXPERIMENTAL DETAILS

The samples structure was analyzed by X-ray diffraction in a D8 Advance Bruker AXS diffractometer using a $\text{CuK}\alpha 1$ radiation. In addition, a SPM Autoprobe CP (Park Scientific Instruments) was used for investigation of the domain structure. The two-pass technique was used for MFM image, both topography and magnetic were obtained simultaneously.

The spectra were taken at room temperature. The magnetic characteristics such as saturation magnetization M_s , coercivity H_c , were measured by a vibrating sample magnetometer for H up to 10 KOe.

The magneto-impedance ratio with applied magnetic field is defined as [5]:

¹ Director of Laboratory of Magnetism: arosales@epm.net.co.

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{[Z(H) - Z(H_{Max})]}{Z(H_{Max})} \times 100 \%$$

$Z(H)$ is the impedance measured at the DC field H . $Z(H_{Max})$ is the impedance measured at the maximum DC field H ($H_{Max} = 75$ Oe). The magneto-impedance was measured by using the so-called four-point method by which a given AC current flows along the magnetic conductor and a voltage is picked up its ends, as is illustrated in block diagram of the figure 1. The measurements were performed at room temperature in the frequency range $0.1 < f < 12$ MHz.

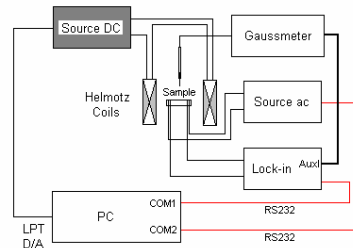


Figure 1. GMI Technique Block Diagram.

RESULTS

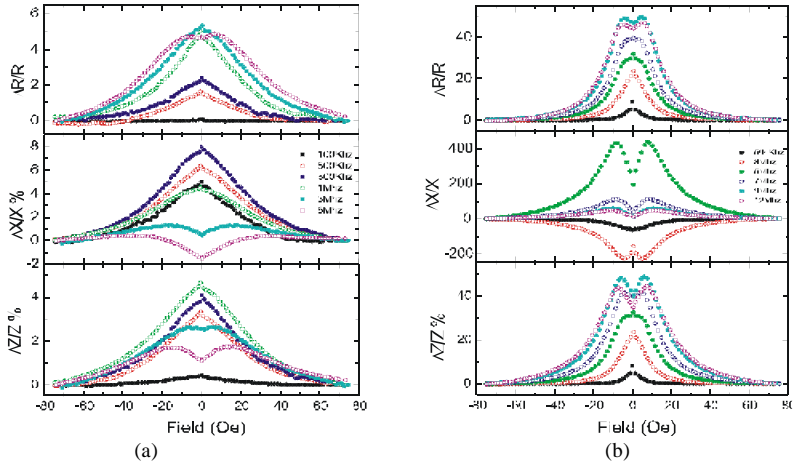


Figure 2.: Reactive, $\Delta X/X$, and Resistive $\Delta R/R$, components, and total Impedance, $\Delta Z/Z$ for a ribbon at different frequencies: (a) $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$. (b) $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$

For the $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy ribbon, in the low frequency regime ($f < 1$ MHz), $\Delta Z/Z$, displays a sharp peak at the DC magnetic field $H = 0$ (single peak behavior). The amplitude of the $\Delta Z/Z$ increases and the peaks becomes broad but reasonably well defined with increasing frequency. The change of impedance is attributed to the magneto-inductive effect arising

from the transverse magnetization process. Our results in the low frequency regime are in agreement with those previously observed in alloy ribbon nanocrystalline.

For higher frequencies ($3 < f < 5$ MHz), the $\Delta Z/Z$ peak splits into two symmetric broad peaks at $H_+ > 0$ and $H_- < 0$, with $H_+ = H_-$ (two peaks behavior). The amplitude of the $\Delta Z/Z$ decreases and the position of the broad peaks show a slightly frequency dependence. The results that we obtained in the intermediate frequency regime are in agreement with those previously observed in alloy ribbon nanocrystalline [6]. The $\Delta Z/Z$ behavior in $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ found at the whole frequency interval of measurements is similar to the $\Delta Z/Z$ behavior observed in $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, but the frequency limits where single peak regime and two peaks regime are observed in $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ are higher than observed ones in $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

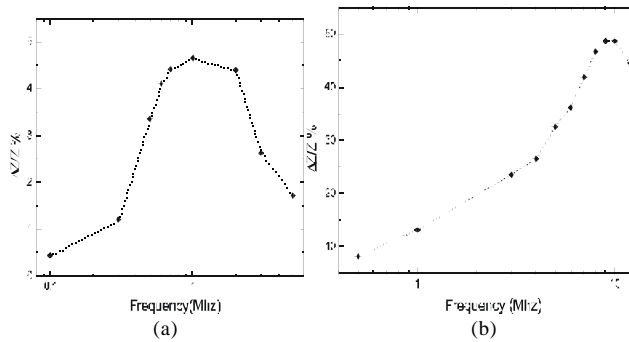


Figure 3.: The frequency dependence of $\Delta Z/Z$ for: (a) $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$. (b) $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

For the $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy, in the low frequency regime ($f < 1$ MHz), The frequency dependence of $\Delta Z/Z$ for $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, $\Delta Z/Z$ reaches a maximum value ($\sim 5\%$) at frequency of 1Mhz.. For $f < 2$ Mhz $\Delta Z/Z$ displays a single peak behavior. For $f > 2$ Mhz $\Delta Z/Z$ displays a two peaks behavior ($H \neq 0$). For $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, $\Delta Z/Z$ reaches a maximum value ($\sim 40\%$) at frequency of 10Mhz.; $\Delta Z/Z$ $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ is higher than $\Delta Z/Z$ for $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$. This difference in the values $\Delta Z/Z$ can be mainly attributed to the differences in the electrical resistivities of these alloys [7].

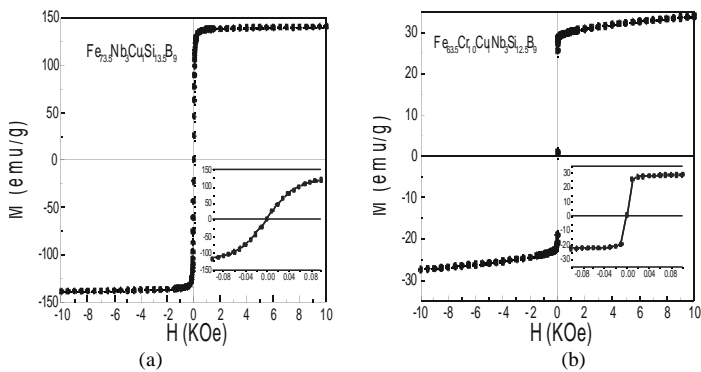


Figure 4. : The hysteresis loops for: (a) $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$. (b) $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

The saturation magnetization are: 142 emu/g for $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, and 30 emu/g for $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy ribbon.

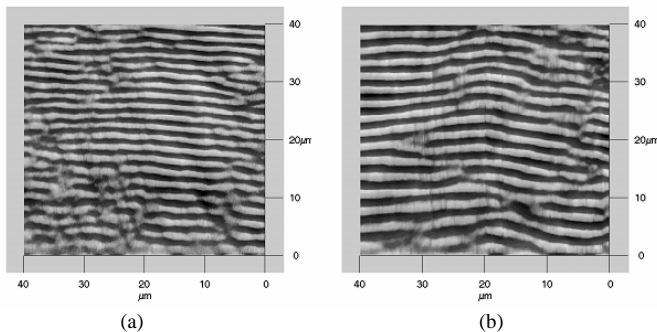


Figure 5.: MFM domain structure. (a) $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$. (b) $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

MFM images show a magnetic domain structure reasonably well defined, but the magnetic domain structure of $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ is better defined than one observed in $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

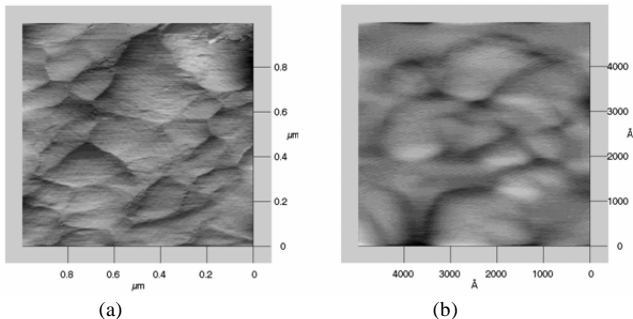


Figure 6.: AFM topography images. (a) $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$. (b) $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

The topographic image shows a grain structure reasonably well defined, but the grain structure of $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ is better defined than the observed one for $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$. The overall grain size for $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ was $0.32\ \mu\text{m}$ and it for $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ was $0.18\ \mu\text{m}$.

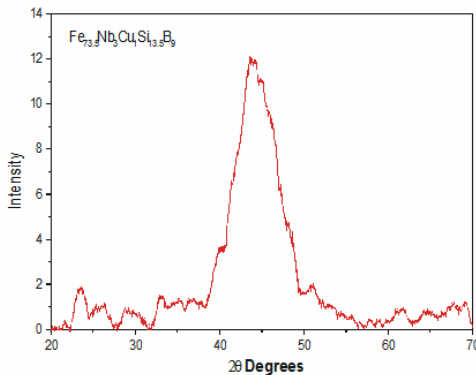


Figure 7.: XRD pattern for $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$

The XRD pattern for $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ shows a broad peaks reasonably well defined which resembles the nanocrystalline state in agreement with the grain structure obtained by atomic force microscopy in the same sample.

CONCLUSION

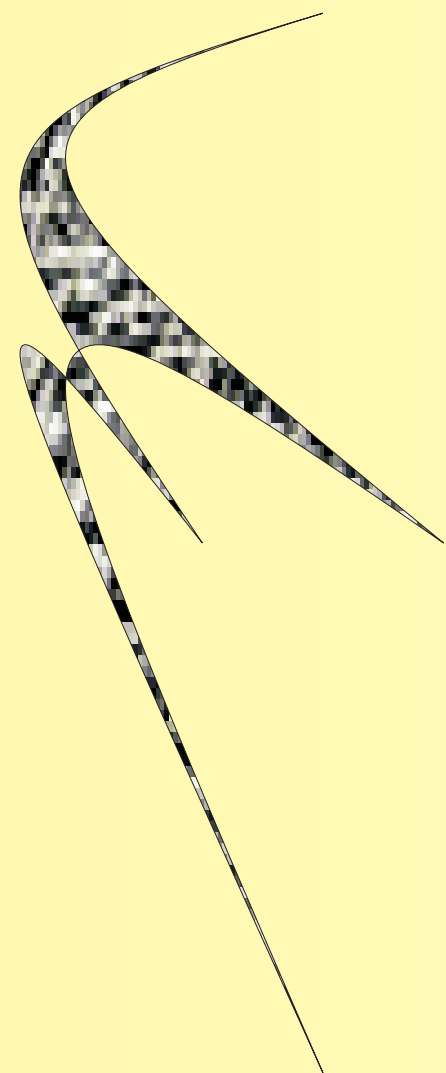
Based on figures (2a,2b); (3a,3b) (4a,4b), and (5a,5b), we can observed that $\Delta Z/Z$ of $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ is greater than $\Delta Z/Z$ of $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, due to the domain structure and the magnetic characteristics of $\text{Fe}_{63.5}\text{Cr}_{10}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ are better.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank to miss Yulieth Arango, Diego Arias members of the Plasma Group of the UNC manizales branch for the assistance in XRD and MFM measurement, and Dr. M. Coisson of the Instituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris for providing the sample $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$.

REFERENCES

- [1] Y-F. Li et al., "Giant Magnetoimpedance Effect and Magnetoelastic Properties in Stress-Annealed FeCuNbSiB Nanocrystalline Wire," IEEE Trans. Magnetic., vol. MAG-38, pp. 3096-3098, 2002.
- [2] V.E. Makhotkin, B.P. Shurukhin, V.A. Lopatin, P. Yu. Marchukov, Yu.K. Levin, sensors Actuators A 25-27 (1991) 759.
- [3] F.L.A. Machado, B. Lopes da Silva, E. Montarroyos, J. Appl. Phys. 73 (1993) 687.
- [4] K. Mandal, S.K. Ghatak, Phys. Rev. B 47 (1993) 14233.
- [5] M. Vazquez, J. Magn. Magn. Matter; 226-230 (2001) 693-693.
- [6] H. Chiriac and T.-A. Óvári, IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 38 No. 5 3057-3062 (2002).
- [7] M. Knobel, H. Chiriac, J.P. Sinhecker, S. Marinescu, T. A. Óvári, and A. Inohue, Sensors and actuators A: Physical 59 (1997), P. 256].



STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES AND MAGNETIC DOMAIN STRUCTURE IN ULTRASOFT FeCrNbCuSiB MAGNETIC ALLOYS

Andrés Rosales^{1(a)}, Victor H. Valencia^{1(b)}, Jorge Morales^{1(c)}, Y-F. Li² and Manuel Vazquez^{2(a)}

¹LABORATORIO DE MAGNETISMO, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE MANIZALES. A.A. 127.

²INSTITUTO DE CIENCIA DE MATERIALES, A.A. 155.28230 LAS ROZAS, MADRID ESPAÑA.

ABSTRACT

The structural and magnetic properties of Fe_{73.5-x}Cr_xNb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ alloy ribbons have been studied after appropriate processing achieving nanocrystalline structure and showing ultrasoft magnetic behavior, especially giant magnetoimpedance effect, GMI[1]. Characterization has been performed by X-ray diffraction (XRD), vibrating sample magnetometry (VSM), GMI measurements and atomic force microscopy/magnetic force microscopy (AFM/MFM). Particular attention has been paid to observation of domain structure by MFM imaging. A periodic stripe domain structure is generally observed. A comparison between structural and magnetic properties (i.e. coercivity, remanence) and magnetic domain structures of above compounds is presented, and such properties are analyzed in connection with the GMI effect .

INTRODUCTION

It is now 12 years since the giant magneto-impedance (GMI) effect was observed [2-4]; this effect consists of a large variation of the impedance, Z, both real and imaginary components of a soft magnetic conductor, when submitted to a relatively small do magnetic field or a stress. Sensitivity of up 500%/Oe has been observed in the very low must obey (less than 1 Oe) field region. In agreement to existing results, to observe GMI, the material has to have good soft magnetic properties (i.e. high permeability and low coercive force), and appropriate domain structure (typically, a transverse one for ribbons in plane, transverse to the ribbon axis and to the applied dc field as well), and a circumferential one for wires. The structural and magnetic properties of the alloy ribbons Fe_{73.5-x}Cr_xNb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ with x = 0 and 10 are studied here by X-ray diffraction (XRD), vibrating sample magnetometry, GMI measurements and atomic force microscopy/magnetic force microscopy (AFM/MFM). A comparison between structural and magnetic properties and magnetic domain structures of above compounds is presented, and such properties are analyzed in connection with GMI effect.

EXPERIMENTAL DETAILS

The samples structure was analyzed by X-ray diffraction in a D8 Advance Bruker AXS diffractometer using a CuK 1 radiation. In addition, a SPM Autoprobe CP (Park Scientific Instruments) was used for investigator of the domain structure. The two-pass technique was used for MFM image, both topography and magnetic were obtained simultaneously. The spectra were taken at room temperature. The magnetic characteristics such as saturation magnetization Ms, coercivity Hc, were measured by a vibrating sample magnetometer for H up to 10 KOe. The magneto-impedance ratio with applied magnetic field is defined as [5]:

Z / [Z(H) - Z(H_Max)] / Z(H_Max) x100%.

Z(H) is the impedance measured at the DC field H
Z(H_Max) is the impedance measured at the maximum DC field H (H_Max = 75 Oe).
The magneto-impedance was measured by using the so-called four-point method by which a given AC current flows along the magnetic conductor and a voltage is picked up its ends, as is illustrated in block diagram of the figure 1. The measurements were performed at room temperature in the frequency range 0.1 < f < 12 MHz.

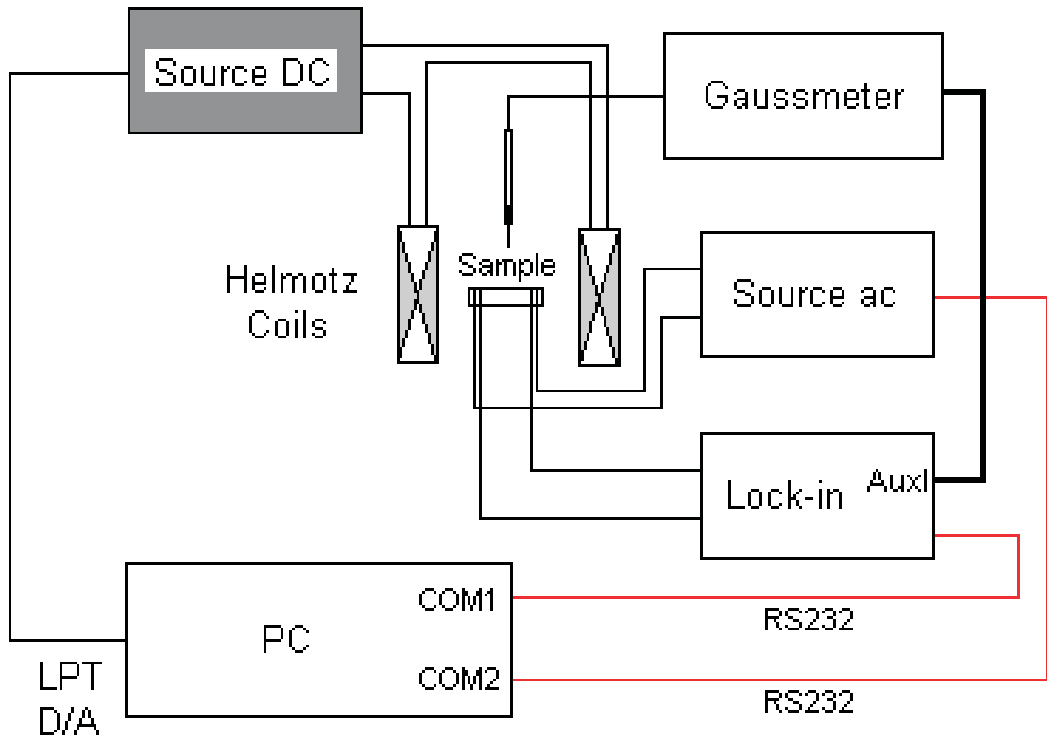


Figure 1. GMI Block Diagram.

RESULTS

Reactive, X/X, and Resistive R/R, components, and total Impedance, Z/Z for a ribbon at different frequencies:
(a) Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉, (b) Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉

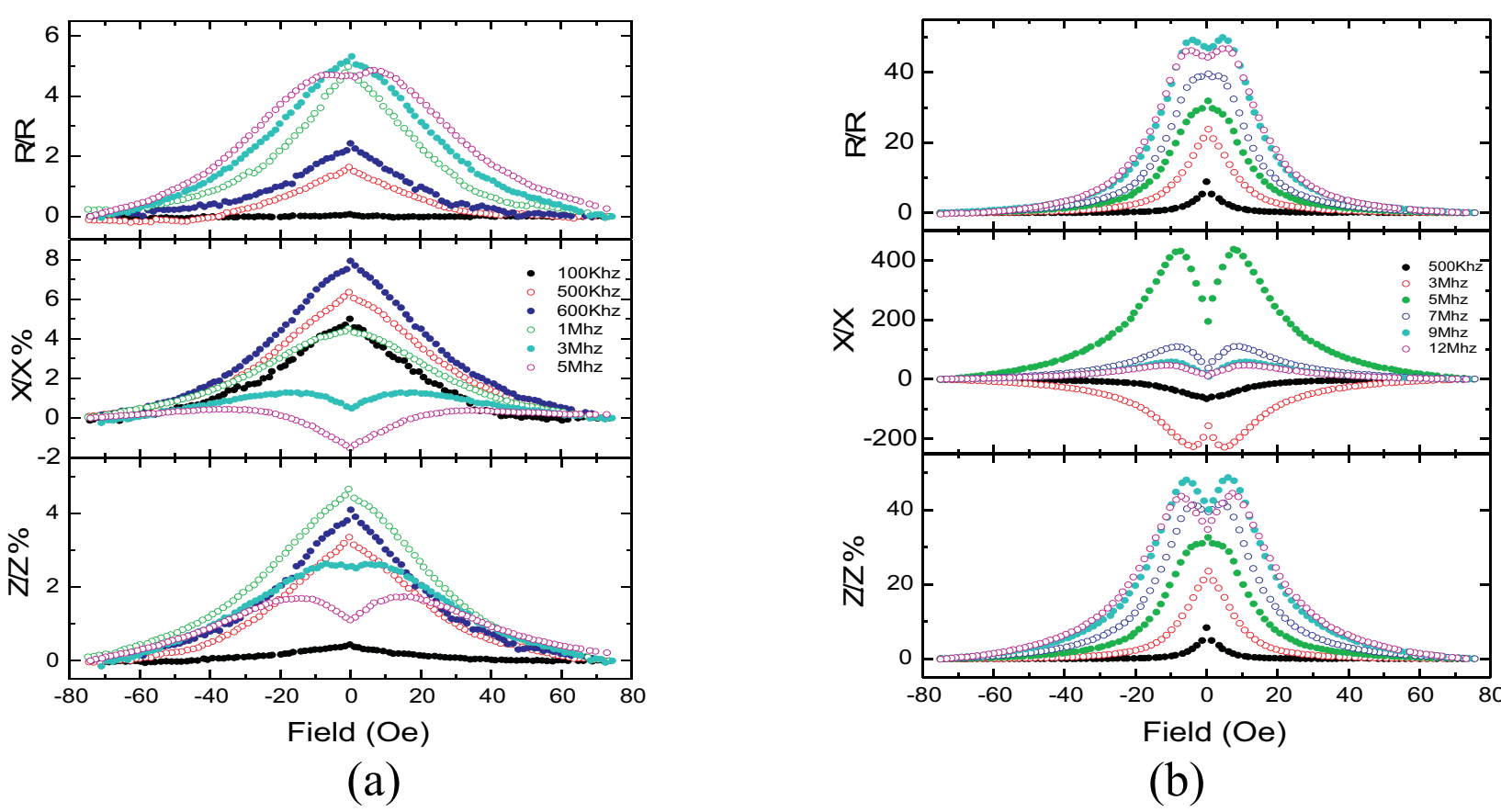


Figure 2.

For the Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ alloy ribbon, in the low frequency regime (f < 1 MHz), Z/Z, displays a sharp peak at the DC magnetic field H = 0 (single peak behavior). The amplitude of the Z/Z increases and the peaks becomes broad but reasonably well defined with increasing frequency. The change of impedance is attributed to the magneto-inductive effect arising from the transverse magnetization process. Our results in the low frequency regime are in agreement with those previously observed in alloy ribbon nanocrystalline. For higher frequencies (3 < f < 5 MHz), the Z/Z peak splits into two symmetric broad peaks at H + > 0 and H - < 0, with H + = H - (two peaks behavior). The amplitude of the Z/Z decreases and the position of the broad peaks show a slightly frequency dependence. The results that we obtained in the intermediate frequency regime are in agreement with those previously observed in alloy ribbon nanocrystalline [6]. The Z/Z behavior in Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ found at the whole frequency interval of measurements is similar to the Z/Z behavior observed in Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉, but the frequency limits where single peak regime and two peaks regime are observed in Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ are higher than observed ones in Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉.

The frequency dependence of Z/Z for: (a) Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉, (b) Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉.

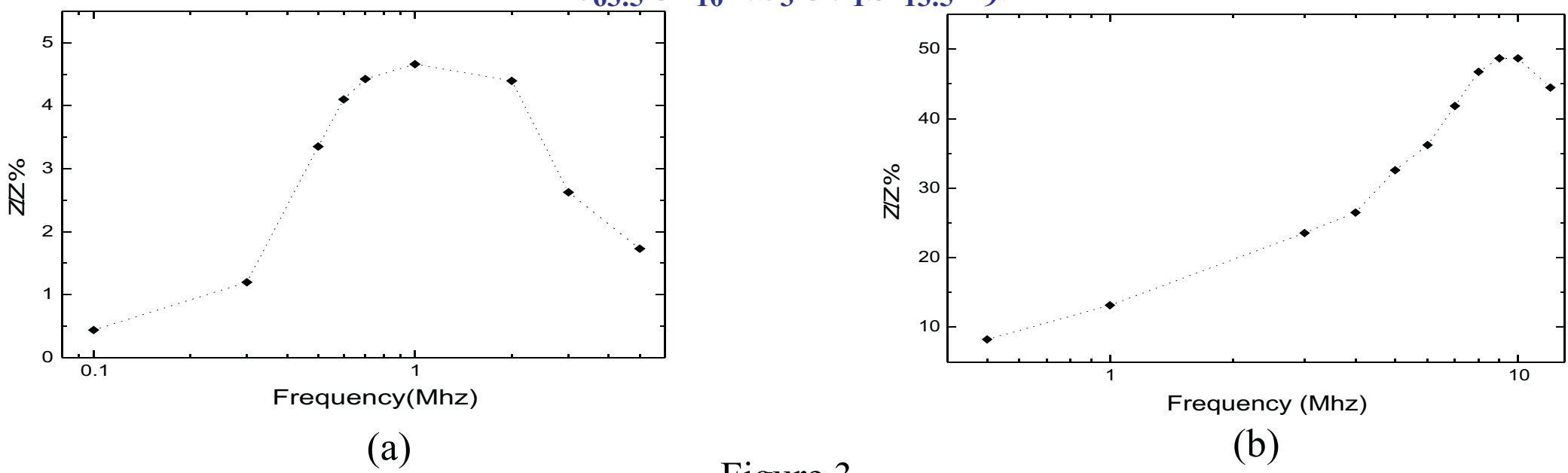


Figure 3.

The frequency dependence of Z/Z for Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉, Z/Z reaches a maximum value (~5%) at frequency of 1Mhz.. For f < 2Mhz Z/Z displays a single peak behavior. For f > 2Mhz Z/Z displays a two peaks behavior (H?0). For Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉, Z/Z reaches a maximum value (~40 %) at frequency of 10Mhz.; Z/Z Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ is higher than Z/Z for Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉. This difference in the values Z/Z can be mainly attributed to the differences in the electrical resistivities of these alloys [7].

The hysteresis loops for: (a) Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉, (b) Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉.

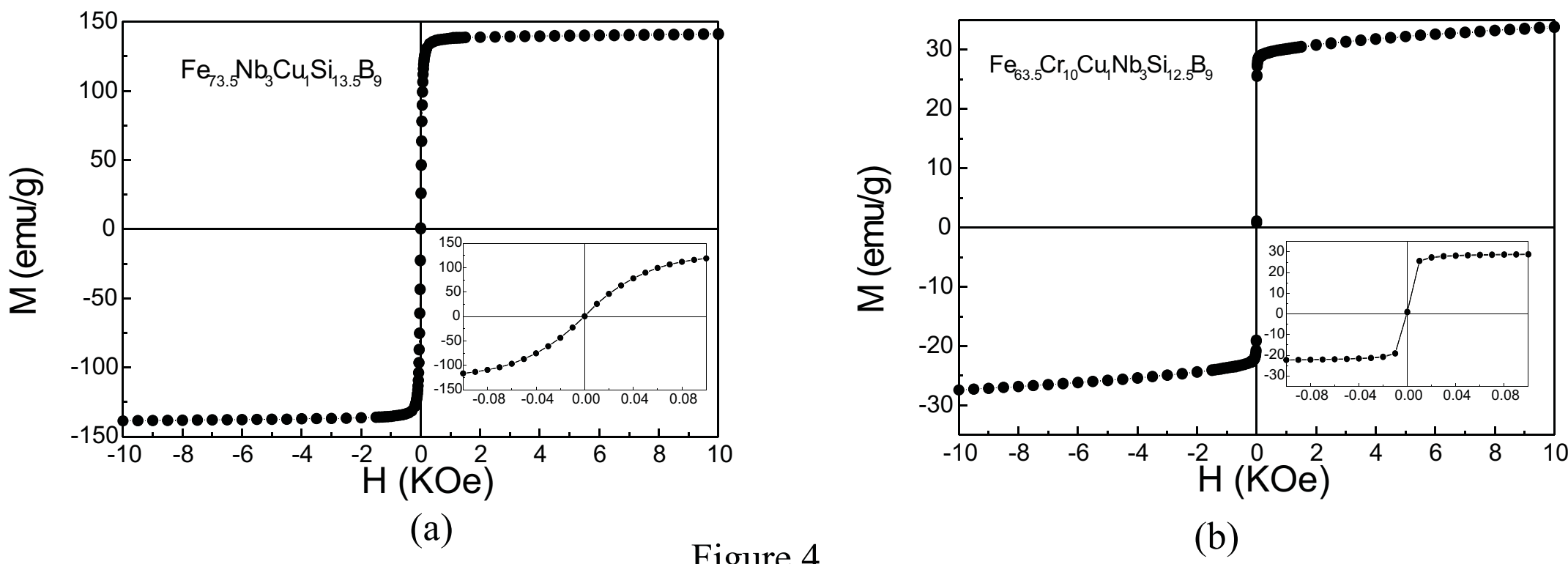


Figure 4.

The saturation magnetization are: 142 emu/g for Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉, and 30 emu/g for Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ alloy ribbon.

MFM domain structure. (a) Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉, (b) Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉.

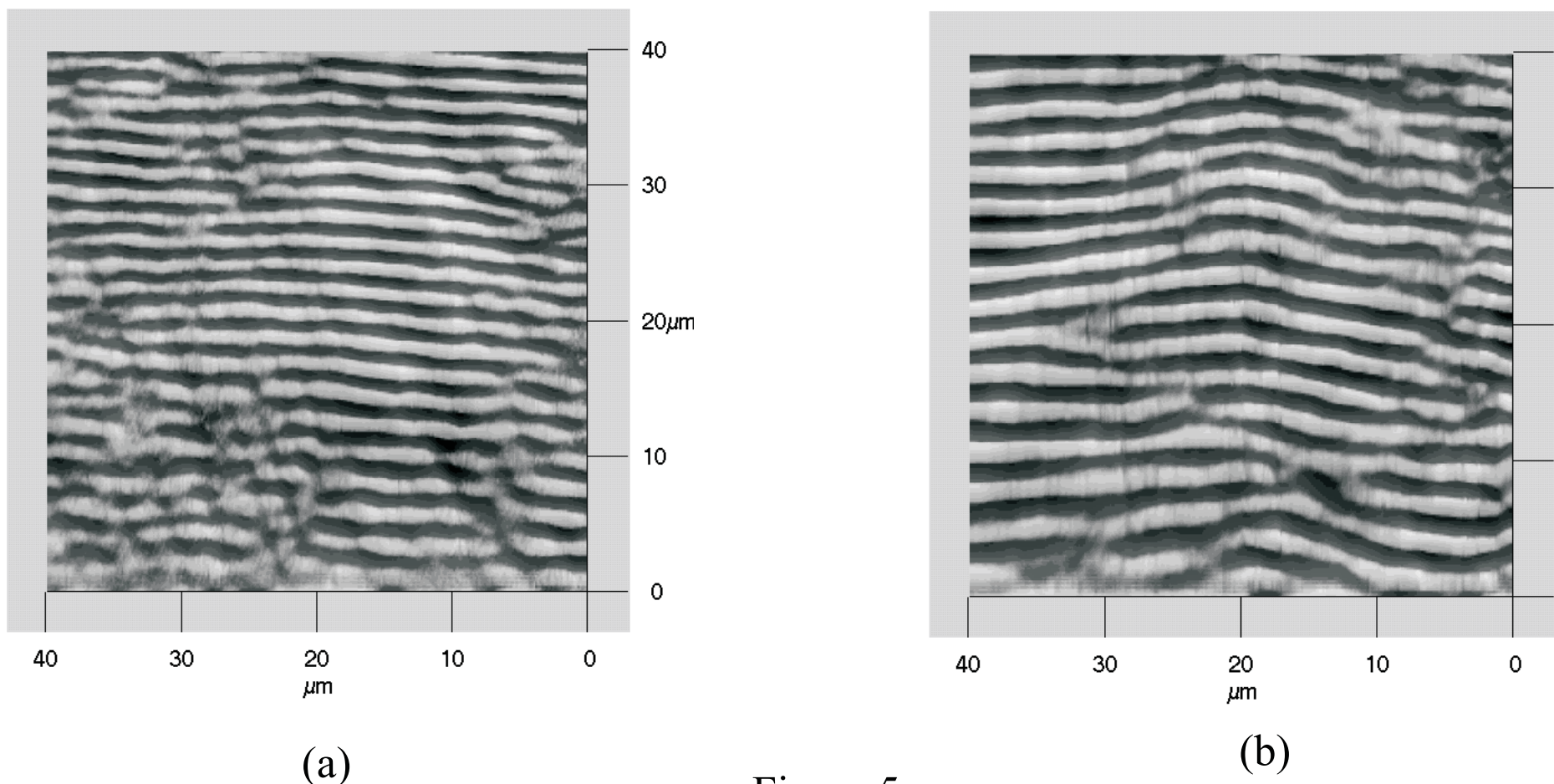


Figure 5.

MFM images show a magnetic domain structure reasonably well defined, but the magnetic domain structure of Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ is better defined than observed one in Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉.

AFM topography images. (a) Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉, (b) Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉.

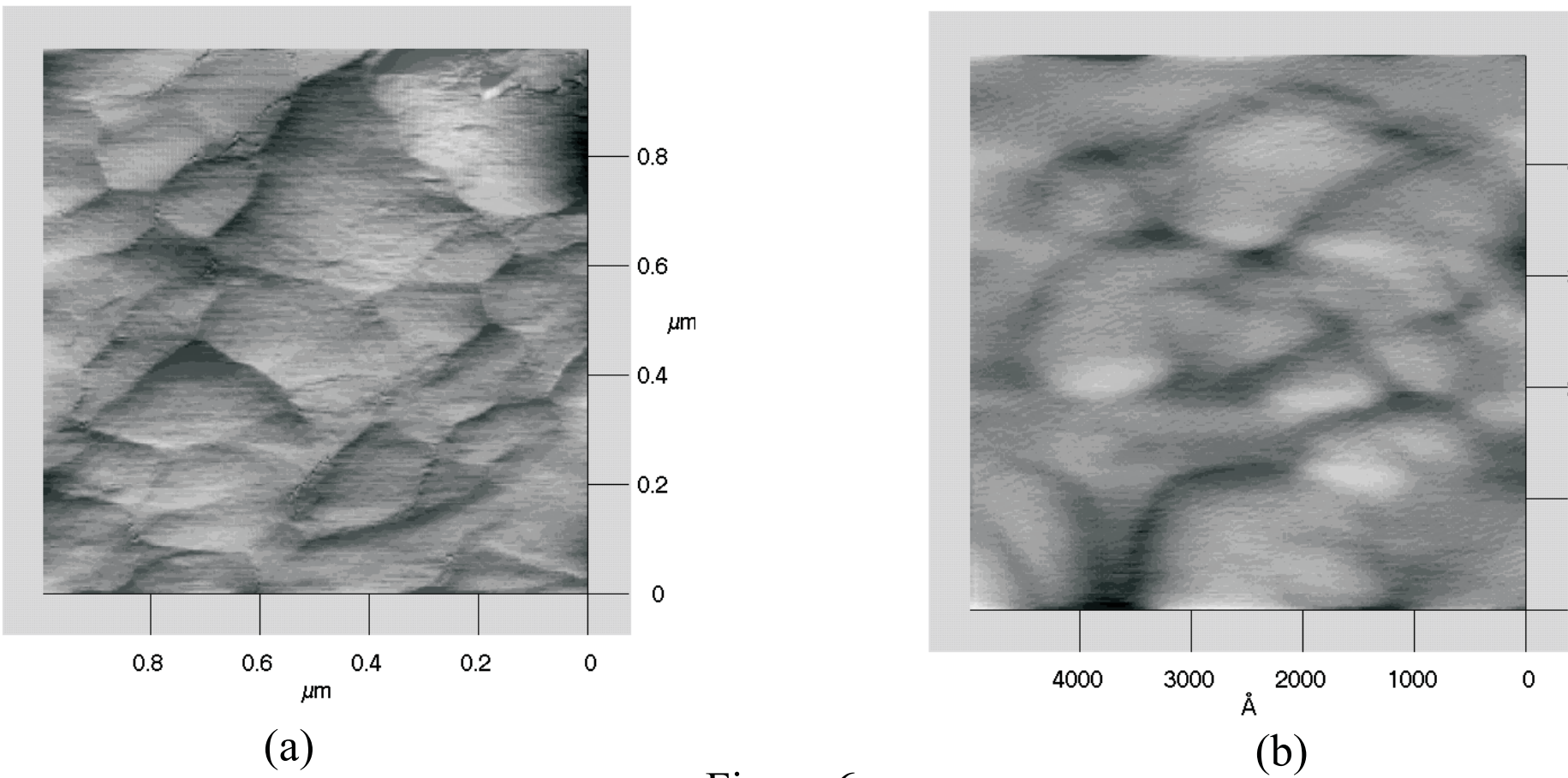


Figure 6.

The topographic image shows a grain structure reasonably well defined, but the grain structure of Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ is better defined than the observed one for Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉. The overall grain size for Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ was 0.32 m and it for Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ was 0.18 m.

XRD pattern for Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉

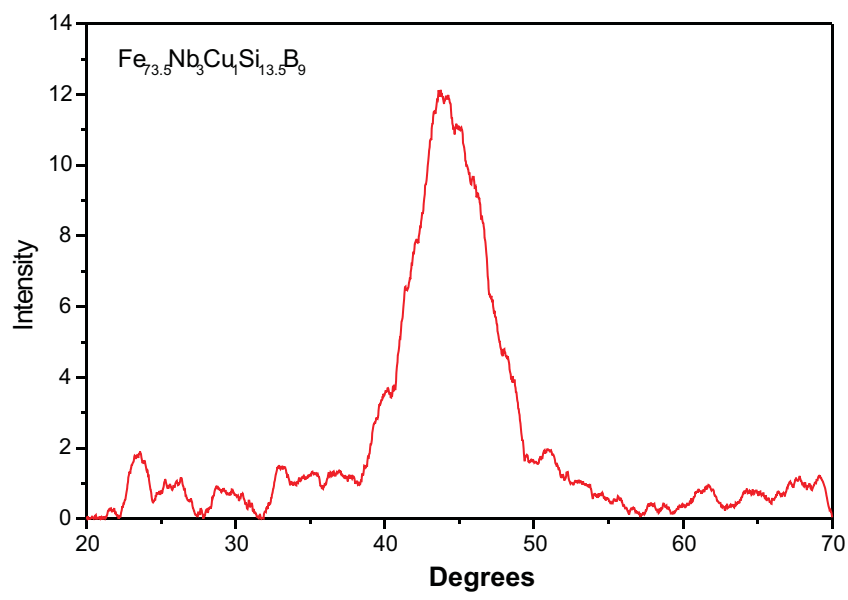


Figure 7.

The XRD pattern for Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ shows a broad peaks reasonably well defined which resembles the nanocrystalline state in agreement with the grain structure obtained by atomic force microscopy in the same sample.

CONCLUSION

Based on figures (2a,2b); (3a,3b) (4a,4b), and (5a,5b), we can observed that Z/Z of Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ is greater than Z/Z of Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉, due to the domain structure and the magnetic characteristics of Fe_{63.5}Cr₁₀Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉ are better.

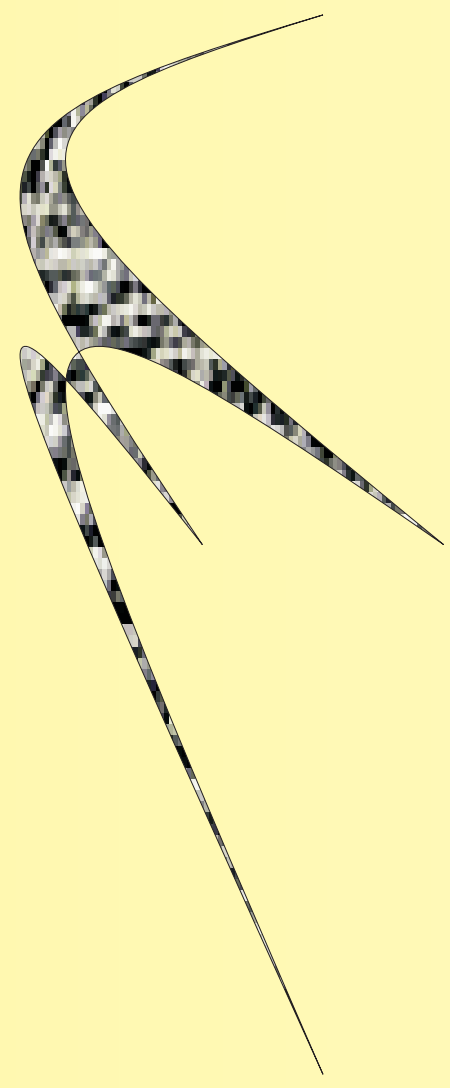
REFERENCES

[1] Y-F. Li et al., “Giant Magnetoimpedance Effect and Magnetoelastic Properties in Stress-Annealed FeCuNbSiB Nanocrystalline Wire,” IEEE Trans. Magnetic., vol. MAG-38, pp. 3096-3098, 2002.
[2]V.E. Makhotkin, B.P. Shurukhin, V.A. Lopatin, P. Yu. Marchukov, Yu.K. Levin, sensors Actuators A 25-27 (1991) 759.
[3]F.L.A. Machado, B. Lopes da Silva, E. Montarroyos, J. Appl. Phys. 73 (1993) 687.
[4]K. Mandal, S.K. Ghatak, Phys. Rev. B 47 (1993) 14233.
[5] M. Vazquez, J. Magn. Magn. Matter; 226-230 (2001) 693-693.
[6] H. Chiriac and T.-A. Óvári, IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 38 No. 5 3057-3062 (2002).
[7]M. Knobel, H. Chiriac, J.P. Sinhecker, S. Marinescu, T. A. Óvári, and A. Inohue, Sensors and actuators A: Physical 59 (1997), P. 256].

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank to miss Yulieth Arango, Diego Arias members of the Plasma Group of the UNC manizales branch for the assistance in XRD and MFM measurement, and Dr. M. Coison of the Instituto Electrotecnico Nazionale Galileo Ferraris for providing the sample Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{13.5}B₉.

1(a) arosales@epm.net.co
1(b) victorva@epm.net.co
2(a) mvazquez@icmm.csic.es

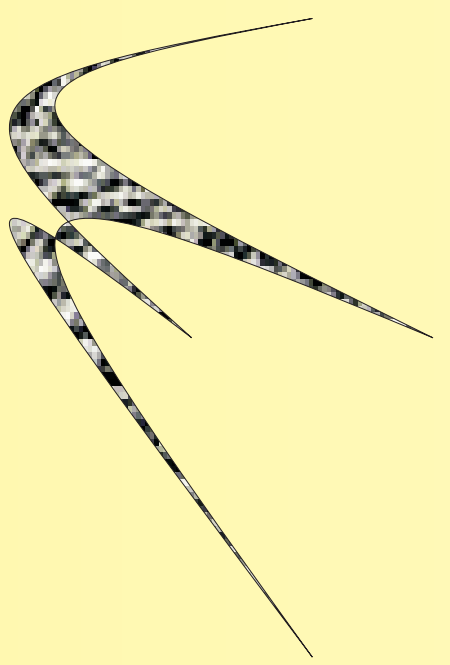


STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES AND MAGNETIC DOMAIN STRUCTURE IN ULTRASOFT FeCrNbCuSiB MAGNETIC ALLOYS

Andrés Rosales^{1(a)}, Victor H. Valencia^{1(b)}, Jorge Morales^{1(c)}, Y-F. Li² and Manuel Vazquez^{2(a)}

¹LABORATORIO DE MAGNETISMO, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE MANIZALES. A.A. 127.

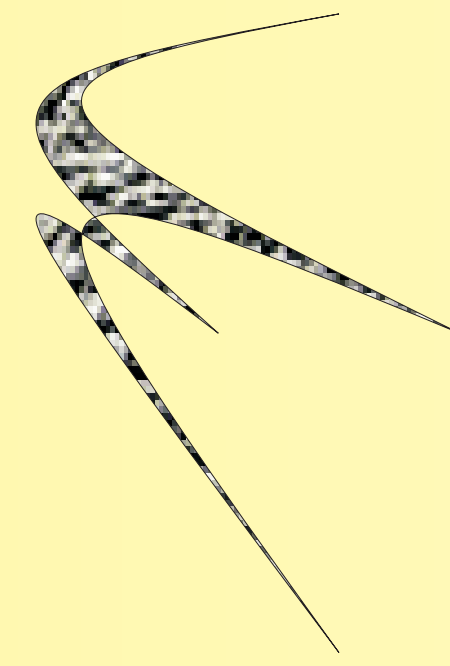
²INSTITUTO DE CIENCIA DE MATERIALES, A.A. 155.28230 LAS ROZAS, MADRID ESPAÑA.



MAGNETIC BEHAVIOR OF $(La_{1-x}Pr_x)_{0.5}Ca_{0.5}MnO_3$

Juan Reina^{1(a)}, Andrés Rosales^{1(b)}

¹LABORATORIO DE MAGNETISMO, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE MANIZALES. A.A. 127.



A FOUR-SUBLATTICE ISING ANTIFERROMAGNET MODEL: APPLICATION TO THE $(La_{1-x}Pr_x)_{0.5}Ca_{0.5}MnO_3$

Andrés Rosales^{1(a)} Juan Reina^{1(b)},

¹LABORATORIO DE MAGNETISMO, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE MANIZALES. A.A. 127.